

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Санкт-Петербургский филиал

Института океанологии им. П.П. Ширшова

Российской академии наук

Санкт-Петербургское отделение Российской академии наук

ПРИРОДНЫЕ ОПАСНОСТИ И КАТАСТРОФЫ: ИСТОРИЯ, ПРОГНОЗ, ЗАЩИТА

КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ

Под редакцией

академика РАН В.Г. Бондура

академика РАН Г.И. Долгих

члена-корреспондента РАН А.А. Родионова

**ИЗДАТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ЭКОНОМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2025**

УДК 551; 556

ББК 26.0

П77

Рецензенты:

член-корреспондент РАН **П.О. Завьялов**

член-корреспондент РАН **А.Л. Собисевич**

П77

Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита : коллективная монография / под ред. В.Г. Бондура, Г.И. Долгих, А.А. Родионова. – СПб. : Изд-во СПбГЭУ, 2025. — 219 с.

ISBN 978-5-7310-6861-1

В коллективной монографии проанализированы основные результаты исследований, представленных на Всероссийской конференции «Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита», прошедшей в Санкт-Петербурге 5–6 июня 2025 г. В представленных материалах рассмотрен широкий круг фундаментальных и прикладных научных проблем, связанных с анализом актуальных и исторических данных о природных опасностях и катастрофах, а также прогнозом их проявлений, защитой и ликвидацией последствий. Представленные статьи отражают современное состояние отечественной науки по проблемам оценки рисков природных катастроф, происходящих в атмосфере, гидросфере и литосфере, а также борьбы с ними. В содержании ряда статей сформулированы рекомендации и требования к системам наземного и дистанционного мониторинга для прогноза природных опасных явлений и катастроф, а также для ликвидации их последствий. Книга рассчитана на читателей из профильных ведомств и организаций реального сектора экономики, а также на широкий круг специалистов, научных работников, профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов старших курсов образовательных учреждений, специализирующихся в данных областях.

УДК 551; 556

ББК 26.0

Авторы-составители:

академик РАН **В.Г. Бондур**, академик РАН **Г.И. Долгих**, член-корреспондент РАН **А.А. Родионов**

*Оригинал-макет изготовлен
в Санкт-Петербургском филиале Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН*

На обложке: литография Станиславы Малаховской «Ущелье Джеты-Огуз» (2024)

ISBN 978-5-7310-6861-1

© Коллектив авторов, 2025

© Изд-во СПбГЭУ, 2025

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences
(St. Petersburg Branch)

Russian Academy of Sciences

NATURAL HAZARDS AND DISASTERS: HISTORY, FORECAST, PROTECTION

COLLECTIVE MONOGRAPH

Edited by

Academician RAS V.G. Bondur

Academician RAS G.I. Dolgikh

Corresponding Member RAS A.A. Rodionov

**PUBLISHING HOUSE OF SAINT PETERSBURG STATE
UNIVERSITY OF ECONOMICS
2025**

UDC 551; 556
LBC 26.0

Reviewers:
Corresponding Member RAS **P.O. Zavyalov**
Corresponding Member RAS **A.L. Sobisevich**

Natural hazards and disasters: history, forecast, protection / Edited by V.G. Bondur, G.I. Dolgikh, A.A. Rodionov. – Saint Petersburg : Publishing house of SPbSUE, 2025. – 219 p.

ISBN 978-5-7310-6861-1

This collective monograph analyzes the key research findings presented at the All-Russian Conference «Natural Hazards and Disasters: History, Forecast, Protection», held in St. Petersburg on June 5–6, 2025. The materials presented examine a wide range of fundamental and applied scientific issues related to the analysis of current and historical data on natural hazards and disasters, as well as the prediction of their occurrence, protection, and mitigation of their consequences. The articles presented reflect the current state of Russian science in assessing the risks of natural disasters occurring in the atmosphere, hydrosphere, and lithosphere, as well as their mitigation. Several articles formulate recommendations and requirements for ground-based and remote monitoring systems for the prediction of natural hazards and disasters, as well as for the mitigation of their consequences. The book is intended for readers from relevant departments and organizations in the real sector of the economy, as well as a wide range of specialists, researchers, faculty, postgraduate students, and senior students of educational institutions specializing in these fields.

UDC 551; 556
LBC 26.0

Authors and compilers:
Academician RAS **V.G. Bondur**, Academician RAS **G.I. Dolgikh**, Corresponding Member RAS **A.A. Rodionov**

*The original model was produced at the Shirshov Institute of Oceanology RAS
(St. Petersburg branch)*

On the cover: Stanislava Malakhovskaya's lithograph «The Jety-Oguz Gorge» (2024)

ISBN 978-5-7310-6861-1

© Authors, 2025
© Publishing house of SPbSUE, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Бондур В.Г., Долгих Г.И., Родионов А.А. Предисловие научных редакторов	8
---	---

РАЗДЕЛ 1

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОНИТОРИНГА, ПРОГНОЗА И ЗАЩИТЫ ОТ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

Бондур В.Г. Космический мониторинг природных опасностей и катастроф для их предупреждения и снижения последствий	11
Гусяков В.К. Редкие катастрофические события природного характера: методы идентификации, прогнозирования и учета рисков	27
Хантулева Т.А., Родионов А.А. Описание катастрофических процессов в рамках нелокальной теории переноса	33
Ивахнюк С.Г. Каскадность взаимных возникновения и развития чрезвычайных ситуаций — результат научно-технического прогресса	37
Долгих Г.И. Лазерно-интерференционные технологии в оперативном прогнозе природных катастроф	41
Сергеева Н.А., Забаринская Л.П., Крылова Т.А., Книппер Н.И. Накопление геофизических данных и формирование баз данных в российских и мировых центрах данных	46
Гилева Е.В., Епифанов С.А., Савело И.Е., Санников Н.А. Создание и поддержка узкоспециализированных баз данных наблюдений природных явлений в Мировом океане	49

РАЗДЕЛ 2

КАТАЛОГИЗАЦИЯ, АНАЛИЗ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

Родионов А.А., Вольцингер Н.Е., Рябченко В.А. Гидродинамическая реконструкция исторических событий в проливах Мирового океана. Фрагменты морской историографии	54
Родионов А.А., Лобанов А.А., Малова Т.И., Зеленкова Н.Г. Баснословное наводнение Невы 1691 г.	60
Майко В.В. Дискуссия об археологических критериях землетрясений в средневековой Таврике	65
Нечаев С.Ю. Проблемные сейсмособытия Верхнего и Среднего Поволжья 1597, 1608, 1806 гг.: новые исторические источники и новые проблемы	69
Корженков А.М., Анарбаев А.А., Корженкова Л.А. Сильные исторические землетрясения на Ферганском участке Великого шелкового пути	73
Дирксен В.Г., Дирксен О.В., Назарова М.А. Определение сезона извержения в прошлом по палинологическим данным на примере извержения кальдеры Курильское озеро на Камчатке 7600 14C лет назад	77

РАЗДЕЛ 3

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ГИДРОСФЕРЕ

3.1. Аномальные явления в атмосфере

Дворников А.Ю., Дубей А.К., Лал П., Кумар П., Кумар А. Аномальная жара в Индии и ее влияние на население в современном климате и в возможном будущем	81
---	----

Безотеческая Е.А. Блокирующие антициклоны в Атлантико-Евразийском регионе в период 1980–2024 гг.	84
Воскресенский К.С., Драбенко Д.В., Орлова Е.Ю. Новоземельская бора, проблемы прогноза и классификации	88
Торопова М.Л., Синькович А.А., Федотова Г.Д. Динамика пространственной структуры основных параметров мощного грозового облака по результатам численного моделирования (1 июля 2023 года).....	92
3.2. Катастрофические природные и антропогенные явления в океане	
Медведев И.П., Цуканова Е.С., Выдрин Д.С., Медведева А.Ю., Пилик Д.И. Цунами в Японском море: исторический обзор и актуальные вопросы.....	96
Медведев И.П., Пилик Д.И., Цуканова Е.С. Цунами в северной части Японского моря.....	100
Медведева А.Ю., Рабинович А.Б. Сравнительный анализ цунами 2004 и 2005 годов в Индийском океане на основе записей метеографов и по результатам численного моделирования.....	104
Зарубина А.И., Носов М.А. Оценка области применимости теории мелкой воды для воспроизведения цунами на примере событий Тихоокеанского региона.....	109
Долгих С.Г. Цунамигенные землетрясения 2024 года по данным лазерного деформографа.....	113
Бондур В.Г., Замшин В.В., Чверткова О.И. Выявление условий развития опасных вредоносных цветений водорослей по спутниковым данным.....	117
Анисимов И.М., Муравьё В.О., Римский-Корсаков Н.А. Динамика многолетних исследований морских захоронений радиоактивных отходов в Карском море	122
Шабанов П.А. Изменения продолжительности безледного периода в Восточно-Сибирском море по данным береговых наблюдений	126

3.3. Риски на водных объектах суши

Филатов Н.Н. Риски, связанные с изменением водных систем Севера под влиянием климата и хозяйственной деятельности: некоторые проблемы и пути решения	131
Румянцев В.А. Инновационный подход к созданию целеполагающей системы контроля за аэрометехногенным загрязнением арктических поверхностных пресных вод.....	135
Махинов А.Н., Махинова А.Ф., Лю Шугуан. Роль климатических изменений в активизации наводнений, русловых процессов и загрязнении реки Амур	138
Замышляев В.И. Плановые деформации меандрирующих рек как опасное гидрологическое явление	142
Гайдукова Е.В., Лобанов К.Э. Методика двумерного анализа гидрологических рисков	146

РАЗДЕЛ 4

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЛИТОСФЕРЕ

Родкин М.В., Липеровская Е.В. К прогнозу землетрясений с использованием комплекса типичных предвестниковых аномалий, каталог JMA, Япония	150
Докукин П.А., Гек Э., Кафтан В.И., Кафтан И., Шевчук Р.В. Современные движения и деформации земной коры в регионе Эгейского моря в связи с сейсмичностью и вулканизмом	155

Алферова Х.В., Маневич Т.М., Соболевская О.В. Природные опасности на Камчатке: исследования и систематизация	160
Полтавцева Е.В., Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Сагарьяров И.А., Федористов О.В. Сеть комплексного геофизического мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений, опасных для района г. Петропавловска-Камчатского: современное состояние и направления развития.....	165
Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Сагарьяров И.А. Подходы к краткосрочному прогнозированию сильных землетрясений, опасных для района г. Петропавловска-Камчатского. Успешный прогноз Шипунского землетрясения (17.08.2024 г., $M_w = 7.0$, $Re = 102$ км, $H = 29$ км)	169
Любушин А.А., Родионов Е.А. Количественная оценка триггерного эффекта влияния потока протонов на сейсмичность.....	175
Жарков Р.В. Хронология извержения Главного Пугачевского грязевого вулкана 8 сентября 2024 года (остров Сахалин).....	180
Козлов Д.Н. О результатах промеров и моделирования рельефа котловины озера Кипящее (о. Кунашир, Курильские о-ва) в 2023 г.....	183
Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Специфика морфологии вулканогенных озер и газогидротермальная активность в кальдере Головнина (о. Кунашир, Курильские о-ва) в 2024 г.	187

РАЗДЕЛ 5

АДАПТАЦИЯ К ПРИРОДНЫМ АНОМАЛЬНЫМ ЯВЛЕНИЯМ

Аксютин О.Е. Деятельность ПАО «Газпром» по адаптации к изменению климата	190
Хомутов А.В., Лейбман М.О. Картографирование опасности проявления склоновых криогенных процессов на ландшафтной основе.....	195
Ковалев И.В. Природоподобные технологии в осушении ландшафтов гумидной зоны Центральной России	198
Ковалева Н.О. Изотопные технологии экологического и почвенно-ландшафтного мониторинга в бассейне Оки: опыт прошлого и вызовы современности.....	202
Хачикян П.П. Обеспечение продовольственной безопасности в чрезвычайных ситуациях как задача принятия решений в условиях глубокой неопределенности.....	206
Малаховская С.В. Небесные горы. Тянь-Шань. «Иссык-Кульские» рефлексии	210
Список авторов	215

ПРЕДИСЛОВИЕ НАУЧНЫХ РЕДАКТОРОВ

*В. Г. Бондур, акад. РАН,
Г. И. Долгих, акад. РАН,
А. А. Родионов, чл.-корр. РАН*

Представляемая вашему вниманию коллективная монография вышла в свет по результатам Всероссийской конференции «Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита» (ПрОК-25), которая проводилась в Санкт-Петербурге с 5 по 6 июня 2025 г.

В состав программного и организационного комитетов конференции вошли представители Отделения наук о Земле РАН, Санкт-Петербургского отделения РАН и академических институтов.

В работе конференции приняли участие более 150 представителей научных и учебных учреждений, в том числе:

- Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН; Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН; Атлантического отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН; Научно-исследовательского института аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»; Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН; Библиотеки РАН; Южного научного центра РАН; Единой геофизической службы РАН; Геофизического центра РАН; Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильинцева ДВО РАН; Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; Института морской геологии и геофизики ДВО РАН; Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; Института водных проблем Севера КарНЦ РАН; Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН; Института динамики геосфер им. М. А. Садовского РАН; Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН; Института геоэкологии РАН; Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН; Института водных и экологических проблем ДВО РАН; Морского гидрофизического института РАН; Института археологии Крыма РАН;
- Санкт-Петербургского государственного университета; Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»; Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы; Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова; Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева; Российского государственного гидрометеорологического университета; Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС РФ; Российского государственного педагогического университета;
- Государственного гидрологического института; Арктического и антарктического научно-исследовательского института; Главной геофизической обсерватории им. А. И. Войкова; Научно-исследовательского института энергетических сооружений — филиала АО «Гидропроект»; Института геотехники и инженерных изысканий в строительстве; Гидрометцентра России; Публичного акционерного общества «Газпром»; Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений.

В материалах докладов и сообщений был рассмотрен широкий круг научных и прикладных проблем, связанных с анализом исторических материалов о природных опасностях и катастрофах, прогнозом их проявления, защитой и ликвидацией последствий. В содержании ряда докладов были сформулированы рекомендации и требования к системам мониторинга, прогноза опасных явлений и предотвращения катастроф, а также ликвидации их последствий. Однако наряду с методами математического и физического моделирования основой надежного оперативного и долгосрочного прогноза природных катастроф остается наличие каталогов и баз данных по проявлениям подобных явлений за максимально возможный период времени.

Монография состоит из пяти разделов. В разделе «Методологические аспекты мониторинга, прогноза и защиты от природных катастроф» проанализированы методы и средства мониторинга состояния природной среды с помощью наземных и космических аппаратных комплексов. Предложены фундаментальные нелокальногидродинамические подходы к описанию эволюции катастрофических процессов с фазовыми превращениями. Описаны методы прогнозирования и оценки рисков редких неблагоприятных событий, а также состояние отечественных и международных баз географических данных.

Раздел «Каталогизация, анализ и реконструкция исторических природных катастроф» посвящен сбору, анализу и физико-математической реконструкции данных об исторических катастрофах, по временным меркам включающих события от нескольких тысячелетий назад (извержение вулкана на Камчатке 7600 лет назад) до современного периода и охватывающих акватории проливов Мирового океана, рек Невы и Волги, территории Крыма, Шелкового пути и Дальнего Востока.

В разделе «Катастрофические явления в атмосфере и гидросфере» собраны материалы по аномальным явлениям в атмосфере в различных регионах планеты — в Индии, Атлантико-Евразийском регионе, на Новой Земле. Подраздел «Катастрофические природные и антропогенные явления в океане» посвящен обзору и актуальным проблемам борьбы с цунами на побережье Тихого океана и Японского моря. В этом же разделе описаны опасности, связанные с цветением вредоносных водорослей и захоронением радиоактивных отходов в Карском море. Риски на водных объектах суши описаны в одноименном подразделе, в котором оценено влияние климатических и антропогенных факторов на водные системы Севера и Сибири, в том числе наводнения и мандривание рек.

Раздел «Катастрофические явления в литосфере» содержит информацию о методах, средствах и системах мониторинга и прогноза землетрясений, факто-рах, влияющих на их проявление. В этом же разделе описаны характеристики и эволюция вулканогенных озер.

В разделе «Адаптация к природным аномальным явлениям» обобщен опыт ПАО «Газпром» по адаптации деятельности этой организации к изменению климата с учетом опасных криогенных процессов. Предложены природоподобные технологии осушения гумидной зоны России и экологического мониторинга бассейна реки Оки. В заключительном материале обоснован сценарный подход к обеспечению продовольственной безопасности в условиях чрезвычайных ситуаций.

По результатам проведенной конференции выявились актуальность использования существующего научно-технического потенциала проектных и промышленных предприятий для переоснащения организаций, занимающихся изучением опасных природных процессов, современными техническими средствами, используемыми при выявлении потенциально опасных участков, их мониторинге и для предотвращения наиболее тяжелых последствий. Кроме того, в будущем необходимо обеспечить возможность оперативного доступа к материалам дистанционных съемок высокого разрешения с отечественных и зарубежных спутников, особенно в случае возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Хочется верить, что у конференции «Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита» — большое будущее. Она вызвала неподдельный интерес у научного сообщества. Конференций, которые бы затрагивали все природные среды и имели бы планетарный географический охват, на данный момент в России нет. Актуальность ее очевидна. Время ее пришло.

РАЗДЕЛ 1

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОНИТОРИНГА, ПРОГНОЗА И ЗАЩИТЫ ОТ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ ДЛЯ ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И СНИЖЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ

В. Г. Бондур¹, академик РАН

¹Научно-исследовательский институт
аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»,
Москва, Россия

SATELLITE MONITORING OF NATURAL DISASTERS FOR THEIR FORECAST AND MITIGATION

V. G. Bondur¹, academician of the RAS

¹Institute for Scientific Research
of Aerospace Monitoring «AEROCOSMOS»,
Moscow, Russia

Показано, что возрастающие негативные антропогенные и естественные воздействия на окружающую среду вызывают рост количества природных катастроф. Это приводит к угрозам для жизни людей и существенному экономическому ущербу. Для их предупреждения и снижения последствий необходимо использовать достижения современной науки и разработанные на их основе методы и технологии космического мониторинга. Рассмотрены новые методы такого мониторинга и приведены некоторые примеры их применения для мониторинга катастрофических природных процессов и явлений, происходящих в атмосфере, океане и на суше.

Increasing negative anthropogenic and natural impacts on the environment cause the growth of the number of natural disasters. That threatens human lives and causes extensive economic damage. To forecast and mitigate such disasters, it is necessary to use the achievements of state-of-the-art science and the methods and technologies of satellite monitoring developed on their basis. New methods of such monitoring are addressed here, and some examples of their application for monitoring catastrophic natural processes and phenomena occurring in the atmosphere, ocean, and on land are given.

В последние годы на планете увеличивается численность населения (в 2035 г. прогнозируется 9 млрд, а в 2040 г. — уже 10 млрд человек), растет урбанизация, развивается промышленность, возрастает антропогенная нагрузка на окружающую среду, происходят изменения климата [1, 2]. Из-за этого значительно изменяются механизмы регуляции природных систем, что приводит к нарастанию изменений окружающей среды, а также к росту количества аномальных процессов и явлений, происходящих в атмосфере, океане и на суше. Рост количества опасных природных явлений и катастроф приводит

к угрозам для жизни людей, существенному экономическому ущербу и к негативным воздействиям на окружающую среду. С 1980 по 2024 гг. число катастрофических процессов на Земле увеличилось в 3,5 раза, а ущерб от них возрос почти в 5 раз.

Ущерб для России от таких аномальных процессов и явлений огромен. По данным МЧС России [3] в 2024 г. в нашей стране произошло 272 чрезвычайных ситуаций (для сравнения в 2023 г. — 305), из них 63% техногенных и 37% природных. Пострадало 690 764 чел. (в 2023 г. — 287595 чел.): от природных — 69%, от техногенных — 31%. Погибло 494 чел. (в 2023 г. — 310 чел.) при этом от природных — 4%, а от техногенных — 96%. Материальный ущерб в 2024 г. составил более 70,64 млрд руб. (в 2023 г. — 64,3 млрд руб.), из них от природных — 77%, от техногенных — 23%. В связи с этим особую актуальность приобрело решение проблем, связанных с предупреждением развития негативных изменений окружающей среды, вызванных как деятельностью человека, так и естественными процессами, происходящими в различных сферах Земли. При этом следует отметить, что в настоящее время на прогнозирование и предупреждение чрезвычайных ситуаций тратится лишь около 10% от затрат на ликвидацию их последствий [4]. Такую тенденцию необходимо изменить!

Это требует полномасштабного внедрения в практику прогнозирования и предупреждения опасных природных процессов и явлений новых научно-методических методов и технологий. Важную роль в решении таких проблем играют достижения современной науки и разработанные на их основе методы, технологии и средства мониторинга, прежде всего, методы и средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в том числе космические [4, 5].

Основными преимуществами космических методов и систем ДЗЗ являются [4–6]: большая обзорность, позволяющая анализировать обширные территории; возможность работы в любых труднодоступных районах; оперативность получения информации; возможность получать информацию, практически в любом масштабе, с высоким пространственным и времененным разрешением в различных участках спектра электромагнитных волн; широкий спектр регистрируемых параметров среды; высокая достоверность получаемых данных; возможность работы при частичном или полном отсутствии топографической основы; дешевизна информации, особенно при работе на больших площадях; возможность передачи и ретрансляции данных, полученных с помощью наземных, водных, воздушных источников.

В настоящее время средства ДЗЗ интенсивно развиваются. Основными тенденциями их развития являются [5, 6]: повышение пространственного и временного разрешения; повышение зон охвата; применение видеосъёмки со спутников; расширение спектральных диапазонов; снижение массы спутников (от 1–100 граммов до более 1 тонны); развитие многоспутниковых систем; увеличение числа спутников с радиолокаторами с синтезированной апертурой и гиперспектральной аппаратурой высокого разрешения; активное использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА); рост объемов данных, формируемых средствами ДЗЗ (более 20% год, в 2025 г. этот объем составил уже величину более 300 эксабайт).

Ниже приведены некоторые примеры применения методов и средств спутникового мониторинга различных опасных природных процессов и явлений.

Космический мониторинг природных пожаров и их последствий

В России ежегодно возникает от 10 до 40 тыс. природных пожаров (на всей планете около 400 тыс.). Площади, пройденные огнем при природных пожарах на территории Российской Федерации, составляют величину от 2,0 до 35 млн га в год [7]. Природные

пожары уничтожают ценную древесину, мешают лесовосстановлению, ухудшают состояние водосборных бассейнов. При пожарах огонь может распространяться на населенные пункты, промышленные предприятия, угрожать людям, жилым домам, объектам энергетики, транспорта, стратегически важным объектам и др. [8]. Природные пожары задымляют большие пространства, изменяют химический состав атмосферного воздуха за счет эмиссии различных малых газовых компонентов, и аэрозолей. Увеличение эмиссииmono- и двуокиси углерода (CO и CO₂), а также других парниковых газов влияет на климат планеты [9]. За сезон вегетации растений поток депонированного из атмосферы углерода за счет фотосинтеза может достигать величин 80–310 г/м² [9]. Крупные природные пожары снижают стоки атмосферного углерода вследствие снижения биомассы. При этом из-за пожаров происходит трансформация лесов в источники углерода за счет прямых выбросов при сгорании биомассы (от 40,0 до 130,0 Мт в год) и косвенных воздействий пожаров на тепловой и водный режимы, а также на структуру и функционирование экосистем [7, 9].

В настоящее время в нашей стране, в первую очередь в НИИ «Аэрокосмос», разработаны спутниковые методы оперативного обнаружения пожаров, оценки их площадей и объемов эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей от них. Они основаны на обработке спутниковых данных различных спектральных диапазонов и пространственно-го разрешения, а также на учете региональных характеристик растительного покрова [7, 9, 10]. Основными преимуществами этих методов являются: повышение точности оценки площадей пожаров и объемов эмиссий газовых компонент и мелкодисперсных аэрозолей (на 40% по сравнению с аналогами); повышение оперативности обнаружения (в 2 раза по сравнению с аналогами).

На рис. 1 в качестве примеров приведены некоторые результаты обнаружения из космоса очагов природных пожаров в различных регионах России, отображаемых на сайте НИИ «Аэрокосмос» (http://aerocosmos.net/emergency_search/).

На основании результатов обработки около 10,0 млн спутниковых изображений исследована 24-летняя динамика площадей, радиационных мощностей (FRP) пожаров, а также объемов эмиссий вредных примесей (в том числе углеродсодержащих климатически активных газов и мелкодисперсных аэрозолей) от них на территории России и ее крупных регионов [10, 11]. На рис. 2 приведены полученные по спутниковым данным ежегодные площади природных пожаров на всей территории России и ее крупных регионов, а также значения радиационной мощности пожаров (FRP) за период времени с 2001 по 2024 гг.

Из анализа рис. 2 следует, что за период времени с 2001 по 2024 гг. для всей территории России наблюдался умеренный линейный тренд к снижению площадей участков территорий, выгоревших при природных пожарах (достоверность аппроксимации R²=0,3085). Сокращение общей площади пожаров в последние годы происходило за счет значительного сокращения сельскохозяйственных палов и лугово-степных пожаров, прежде всего в Европейской части территории России, а также сокращения площадей пожаров в Сибирском федеральном округе [10]. Кроме того, это связано с совершенствованием системы мер по раннему обнаружению и тушению природных пожаров [10, 11]. Это приводит к таким же тенденциям в изменении объемов эмиссий углеродсодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей, иллюстрирующихся на рис. 3 [10].

В то же время из анализа рис. 26 следует, что ежегодные средние значения радиационной мощности пожаров FRP увеличивалась с характерным растущим трендом. Это может быть связано с увеличением в последние годы доли лесных пожаров, а также их большой интенсивностью, что было отмечено также в работах [10, 11].

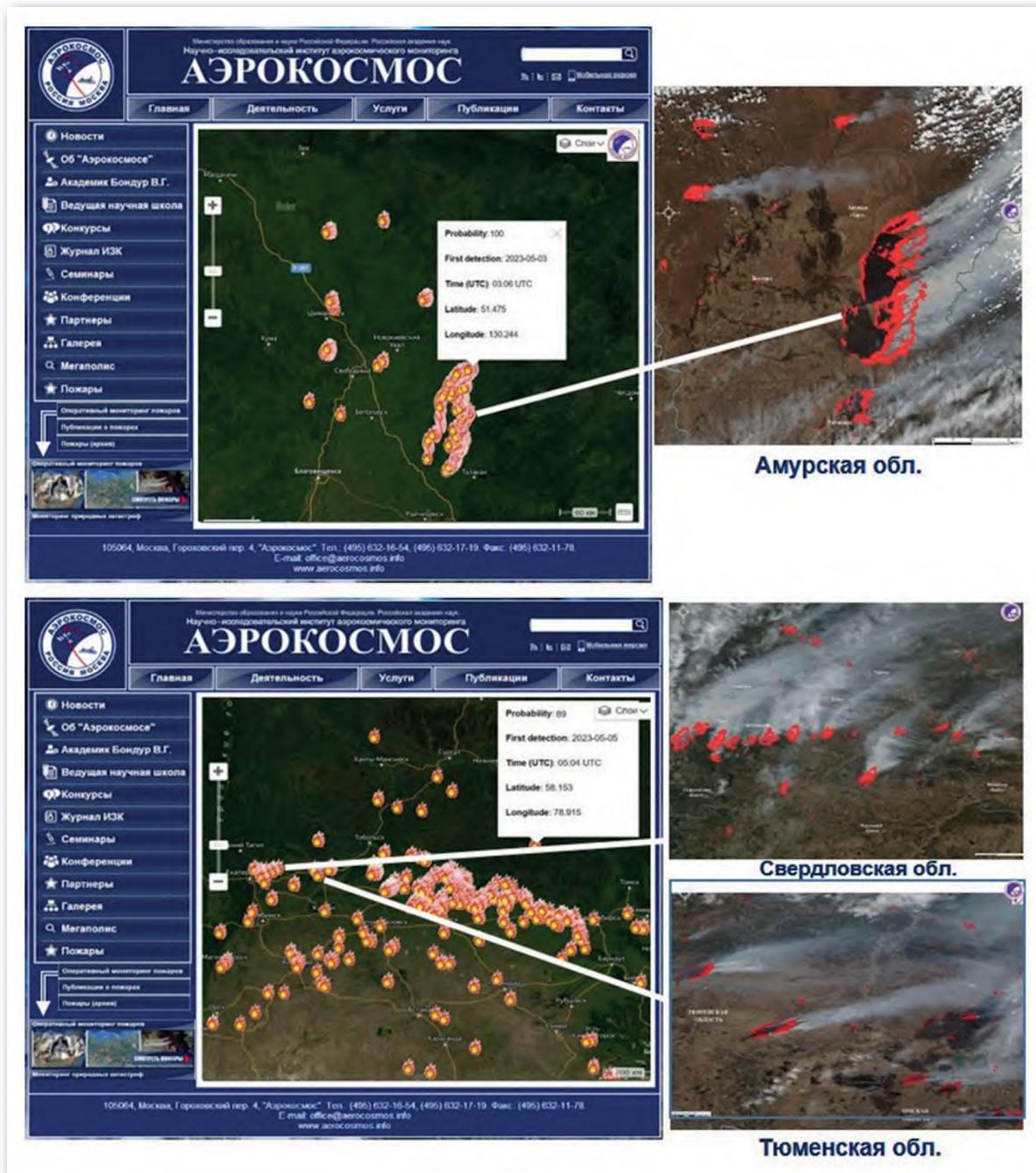


Рис. 1. Примеры очагов пожаров, обнаруженных из космоса, отображаемых на сайте НИИ «Аэрокосмос» (http://aerocosmos.net/emergency_search/)

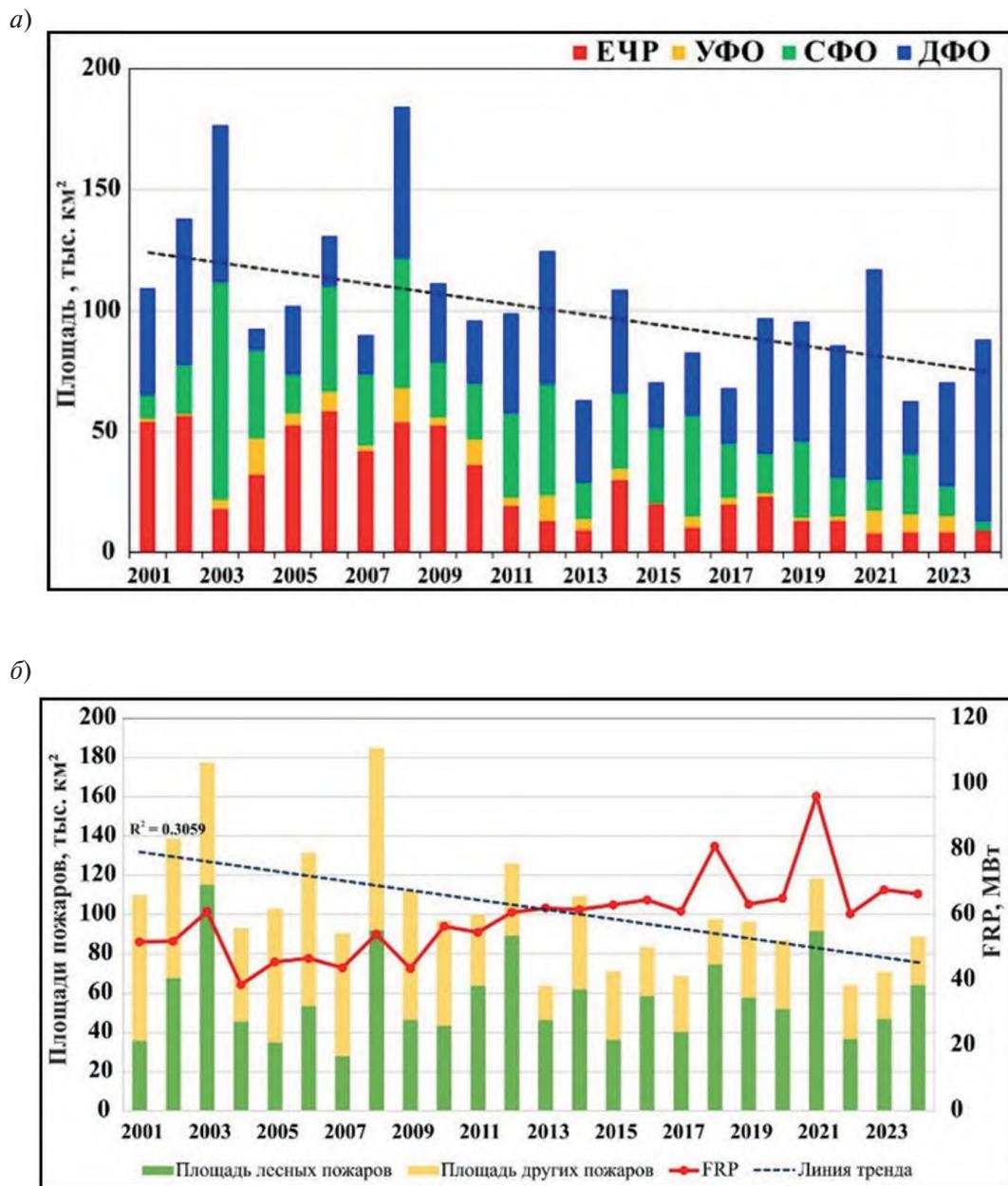


Рис. 2. Ежегодные площади природных пожаров на всей территории России и ее крупных регионов и значения радиационной мощности пожаров (FRP) за период времени с 2001 по 2024 гг.:

а — на всей территории России и ее регионов (Европейская часть России — ЕЧР, Уральский — УФО, Сибирский — СФО и Дальневосточный — ДФО федеральные округи);
 б — площади лесных (зеленый) и других типов (желтый) пожаров на территории России и радиационные мощности пожаров — FRP (красная кривая)

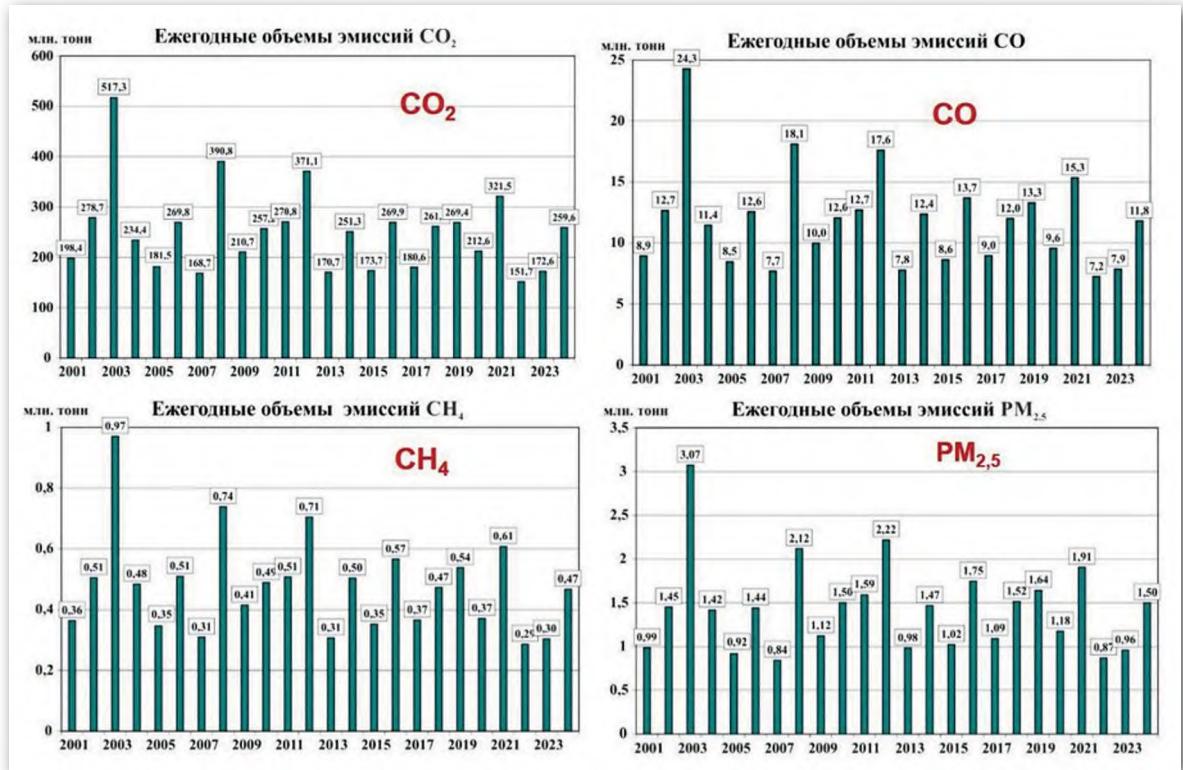


Рис. 3. Результаты спутникового мониторинга эмиссий углеродсодержащих газов (CO_2 , CO , CH_4) и мелкодисперсных аэрозолей ($\text{PM}_{2.5}$) при природных пожарах с 2001 по 2024 гг.

Космический мониторинг сейсмоопасных территорий

Анализ природных опасностей свидетельствует о том, что такие стихийные бедствия как сейсмические события и связанные с ними негативные воздействия на отдельные территории, представляют растущую угрозу безопасности людей и экономике [4]. Землетрясения являются одними из самых опасных природных явлений. В связи с этим очень важным является проведение систематического мониторинга сейсмоопасных территорий, в том числе космического, и исследование особенностей изменения различных прогнозистических параметров, проявляющихся в различных средах, с целью их последующего использования для выявления предвестниковых особенностей, возникающих перед землетрясениями [12, 13].

В последнее время разработаны подходы и методы регистрации из космоса предвестников сильных землетрясений ($M \geq 6$), проявляющихся в аномалиях различных геофизических полей, в том числе, параметров ионосферы, геодинамических особенностей и вариаций тепловых полей [4, 6, 12, 13]. С использованием спутниковых данных при подготовке и протекании сейсмических событий регистрируются аномалии: электронной концентрации в слое F2 и полного электронного содержания (ТЕС) ионосферы, а также скорости его изменений; аномалии высотных распределений электронной концентрации (см. рис. 4а); вариации температур земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы; мощности уходящего длинноволнового излучения (см. рис. 4б); аномалий линеаментных систем, проявляющихся в вариациях их плотностей и роз-диаграмм (см. рис. 5) [13].

Кроме того, спутниковые изображения используются для анализа последствий землетрясений. На рис. 6 в качестве примера приведены результаты регистрации из космоса последствий серии разрушительных землетрясений с магнитудами $M = 5,0\text{--}7,8$, происходивших на территории Турции в феврале 2023 г.

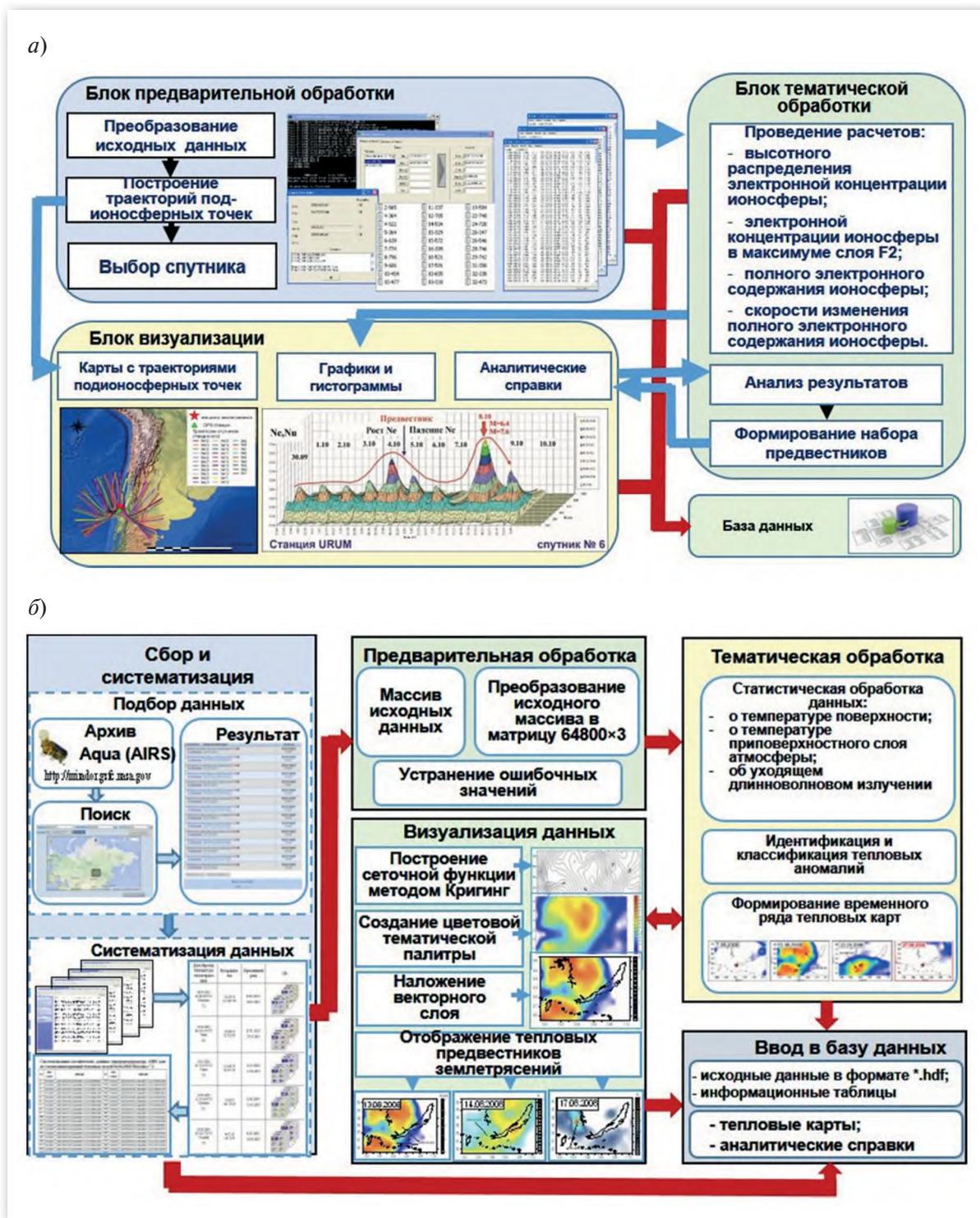


Рис. 4. Регистрация из космоса аномалий ионосферных параметров и тепловых полей:
а — параметров ионосферы; *б* — тепловых полей

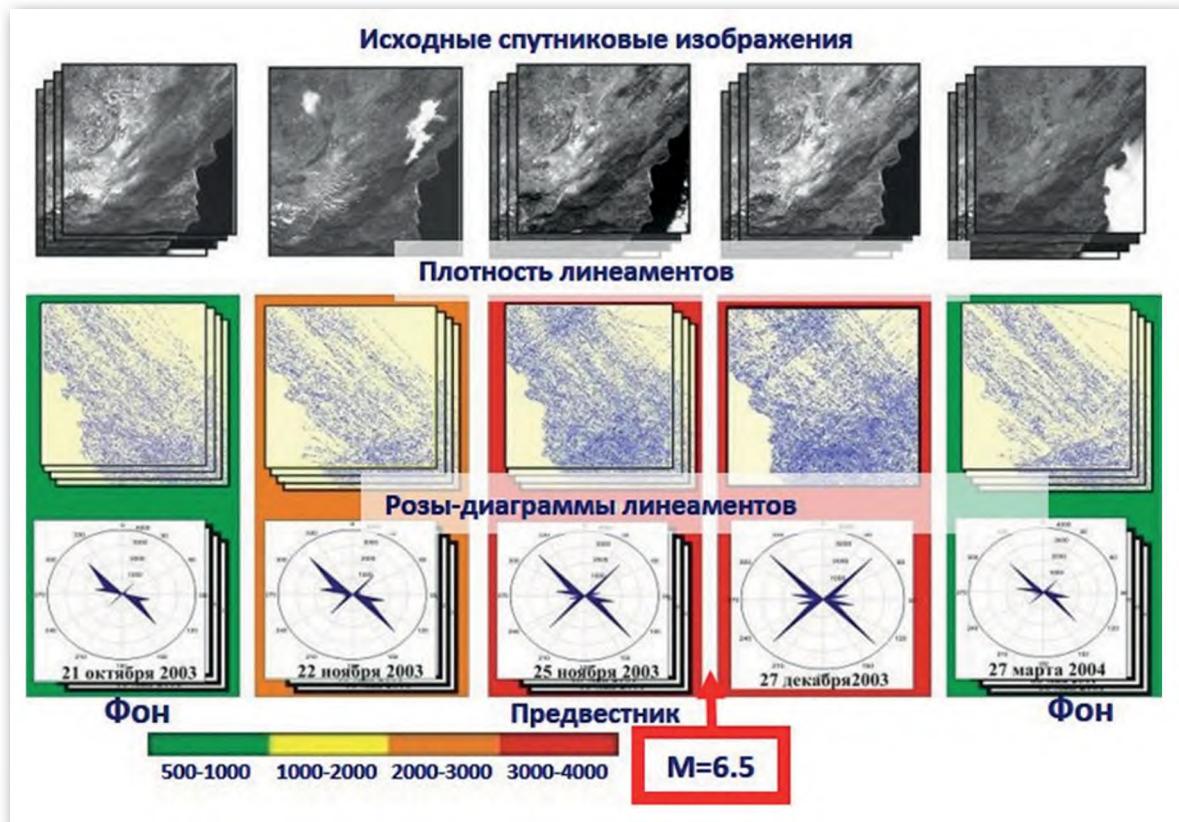


Рис. 5. Вариации плотностей и роз-диаграмм линеаментов для землетрясения с $M = 6,5$

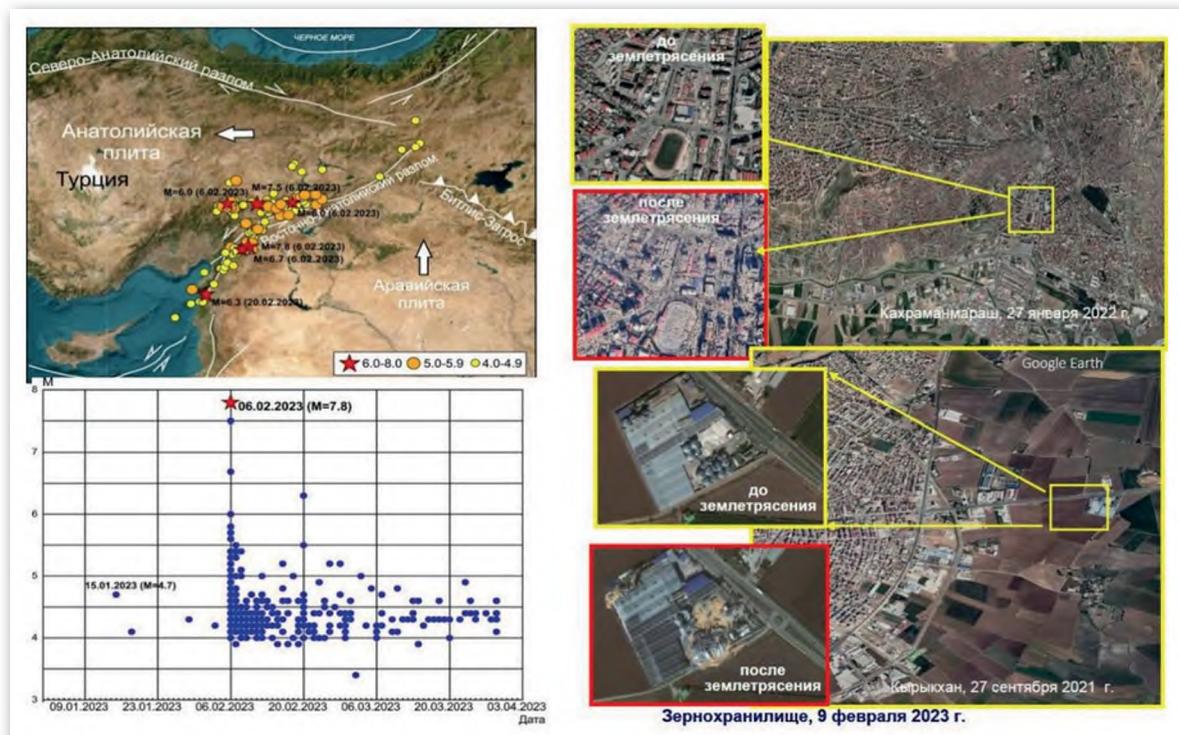


Рис. 6. Регистрация из космоса последствий серии разрушительных землетрясений в Турции в феврале 2023 г. (магнитуды $M = 5,0 - 7,8$)

Для выявления зон вероятного возникновения сильных сейсмических событий перспективно применение методов машинного обучения. Для этого нами анализировались пространственные распределения сильных землетрясений (с магнитудами $M > 6$), построенные на основании данных за период времени с 1949 по 2024 гг., путем применения различных моделей машинного обучения, а также нейросетей с глубоким обучением. На рис. 7 приведено пространственное распределение выявленных зон вероятного возникновения землетрясений (с магнитудами $M > 6$) на всей территории планеты с использованием модели Случайного леса, а также нейросетей «Многослойный перцептрон» (MLP) и «Долгая краткосрочная память» (LSTM). В результате проведенных исследований показано, что применение нейросетей с глубоким обучением позволило выявить большее (на 40%) количество зон максимальной сейсмичности (с магнитудами $M > 6$) по сравнению с улучшенной моделью Случайного леса [12]. На рис. 8, в качестве примера иллюстрируются зоны вероятного возникновения сейсмических событий с магнитудами $M > 6$ (красные звезды) и $M > 7$ (желтые звезды) в районе полуострова Камчанка и Курило-Камчатской гряды.

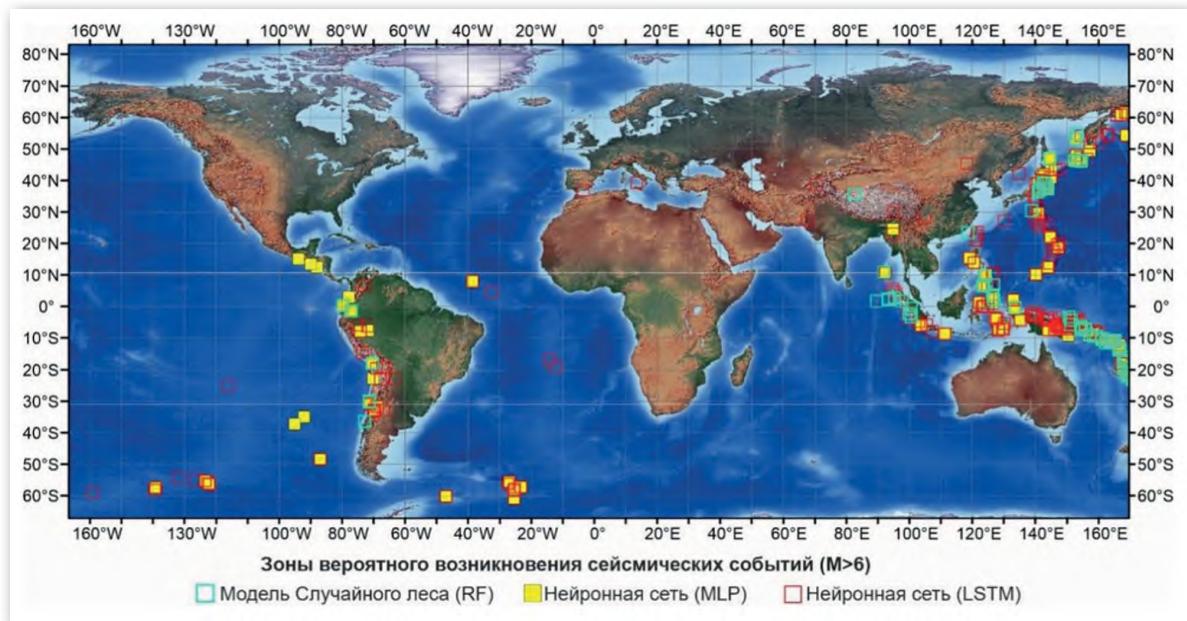


Рис. 7. Пространственное распределение выявленных зон вероятного возникновения землетрясений ($M > 6$) с использованием модели Случайного леса, нейронных сетей MLP, LSTM

На этом же рисунке зеленым пунктирным кругом обозначена зона свершившихся землетрясений с магнитудами $M > 7$, происходившими с 20 июля по 19 сентября 2025 г. Внутри этого круга звездой зеленого цвета показано место землетрясения с магнитудой $M = 8,8$, свершившееся 30 июля 2025 г. Эпицентр такого мощнейшего землетрясения, являвшегося наиболее значимым сейсмическим событием для этого региона, располагался близко к зонам наиболее вероятного возникновения землетрясений с магнитудами $M > 6$ и $M > 7$ (см. рис. 8).

Исследования оползневых процессов по спутниковым данным

Оползни являются одними из наиболее опасных природных процессов. Для выявления процессов реактивации оползней предложен новый многопараметрический подход, основанный на комплексировании методов разновременной радиоинтерферометрии

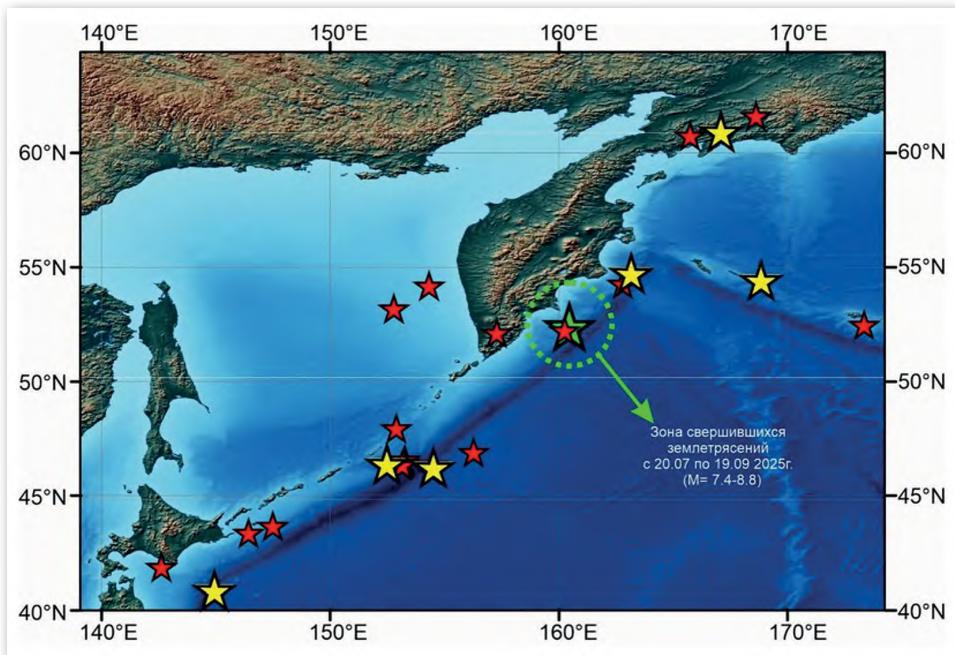


Рис. 8. Зоны вероятного возникновения сейсмических событий: с $M > 6$; \star с $M > 7$; зона свершившихся землетрясений с $M > 7$ в 2025 г. \odot ; землетрясение с $M = 8.8$, свершившееся 30 июля 2025 г. \star

и радиополяриметрии с использованием результатов облачных расчетов временных рядов радарных данных, а также методов постоянных рассеивателей и поляриметрической декомпозицией данных с двойной поляризацией [14]. Преимуществами этого подхода являются: повышение точности оценки оползневых процессов на 30%; исключение неопределенности, возникающие при использовании только одного метода; обеспечение всепогодного мониторинга. На рис. 9 приведены примеры результатов применения такого многопараметрического подхода для анализа реактивации оползня, происходившего на реке Бурея в 2018–2021 гг. С использованием спутниковых радиолокационных изображений выявлены процессы реактивации после схода оползня, произошедшего 11 декабря 2018 г. на реке Бурея, путем совместного применения метода дифференциальной радиолокационной интерферометрии, позволяющего оценивать смещения земной поверхности на больших площадях на небольших временных интервалах, и метода постоянных рассеивателей, позволяющего оценить суммарные смещения отдельных рассеивателей за несколько лет в бесснежные периоды времени.

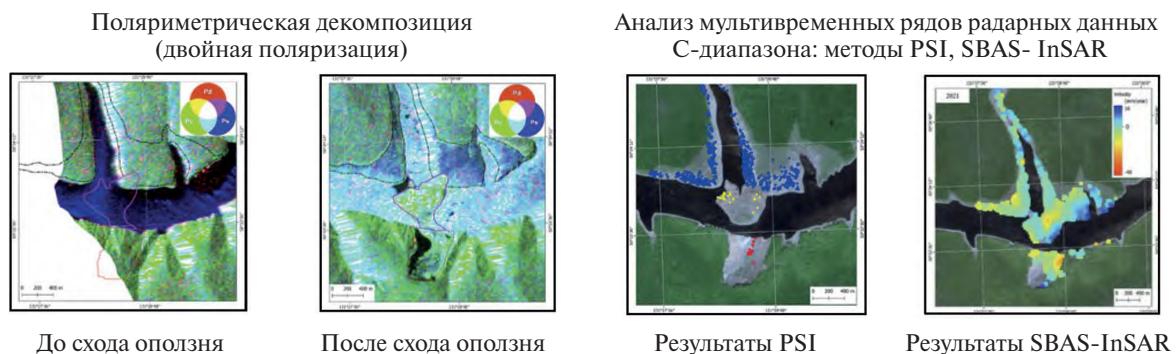


Рис. 9. Результаты применения предложенного многопараметрического подхода для анализа реактивации оползня, происходившего на реке Бурея в 2018–2021 гг.

На основании этого подхода установлено, что в 2019 г. такие смещения были ближе к центру оползня, а в 2020 и 2021 гг. деформации были выявлены на краю боковой восточной линии отрыва оползня. При этом максимальная скорость смещений уменьшилась с 40 мм/год до 30 мм/год [14].

Космический мониторинг аномальных биогенных загрязнений водной среды

Разработан метод дистанционного обнаружения аномальных биогенных загрязнений морских акваторий, основанный на комплексном анализе полей температуры (SST), фотосинтетически активной радиации (PAR), концентрации хлорофилла-а, уровня морской поверхности, поля ветра, регистрируемых по спутниковым данным. Его преимуществами являются [15]: возможность выявления причин и прогнозирования рисков возникновения аномальных биогенных загрязнений акваторий; оперативность; большой пространственный охват исследуемых территорий.

На основании систематизации и обработки свыше 40 тыс. спутниковых оптических и радиолокационных изображений (за 40 лет) для акваторий у полуострова Камчатка, выявлены причины массовой гибели гидробионтов осенью 2020 г. [15]. С использованием длительных временных рядов разнородных спутниковых и модельных данных об уровне океана, температуре морской поверхности, концентрации хлорофилла-а, параметрах слизиевых образований и характеристик взвесей обнаружены и проанализированы причины аномального вредоносного цветения водорослей, произошедшего осенью 2020 г. на Камчатке. Установлено (см. рис 10), что вредоносному цветению водорослей предшествовали температурные аномалии, достигающие 6 °C (превышение климатической нормы более чем на три интервала стандартного отклонения) и интенсивная изменчивость уровня океана, сопровождающаяся образованием вихревых структур, перемешивающих водные массы и обеспечивающих поступление питательных веществ в верхний фотический слой. Такое аномальное повышение температуры и специфические условия циркуляции вод привели к аномальному росту концентрации хлорофилла-а (в 5–8 раз выше фона) и существенному изменению биогенного режима (см. рис 10, 11). На вредоносное цветение также оказывал влияние речной сток, который интенсивно привносил в морскую среду минеральные и биогенные взвеси (концентрация общего взвешенного вещества в пределах плюма реки Налычева достигала в 2020 г. значений 10 мг/м³ и более), расширяющие кормовую базу для микроводорослей.

Это вызвало вредоносное цветение микроводорослей рода *Karenia* («красный прилив»), что привело к гибели гидробионтов в Авачинском заливе и в других акваториях у п-ва Камчатка [15].

Метод апробирован на примере экологических происшествий, произошедших не только у п-ова Камчатка в 2020 г., но и у о. Хоккайдо (Япония) осенью 2021 г., а также в Мраморном море (у побережья Турции) весной–летом 2021 г. и у о. Чиле (Чили) летом 2016 г. [15].

Космический мониторинг тайфунов

Одним из наиболее важных направлений исследований Земли из космоса является мониторинг тропических циклонов (ТЦ), называемых также тайфунами и ураганами [16]. Тайфуны — самые разрушительные из всех видов природных катастроф. Они влияют на территории более 50 стран, в которых проживает более половины человечества. Наибольший ущерб приносят ураганные ветры, сопровождающиеся штормовыми нагонами воды и наводнениями [4, 16]. Эти катастрофические явления уносят множество человеческих жизней. Поэтому чрезвычайно важно изучать тайфуны с целью выделения характерных признаков для прогноза их эволюции, направления движения и своевременного предупреждения.

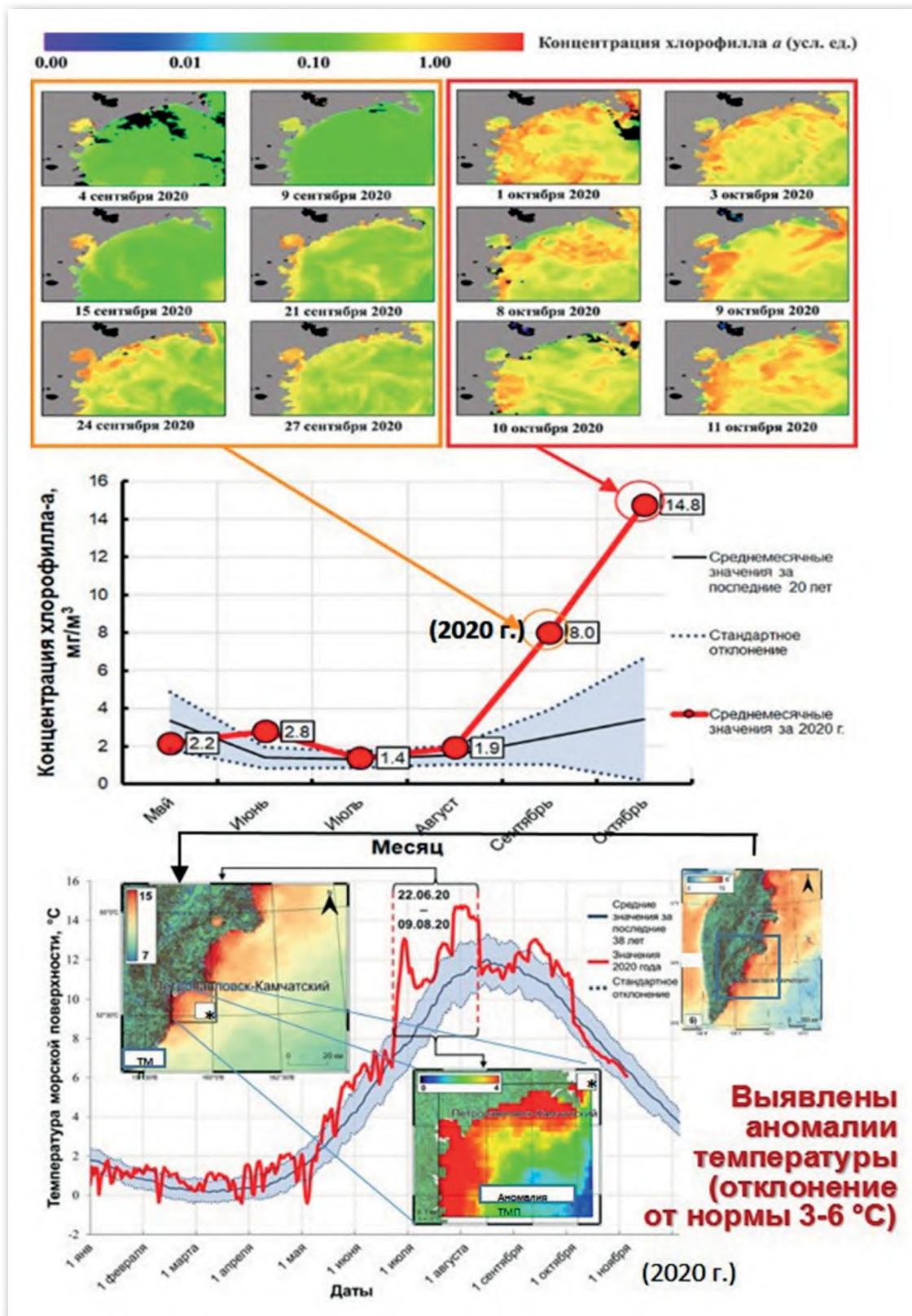


Рис. 10. Результаты выявления превышения температуры морской поверхности по сравнению с фоном, которая привела к аномальному росту концентрации хлорофилла-а (в 5–8 раз выше фона)

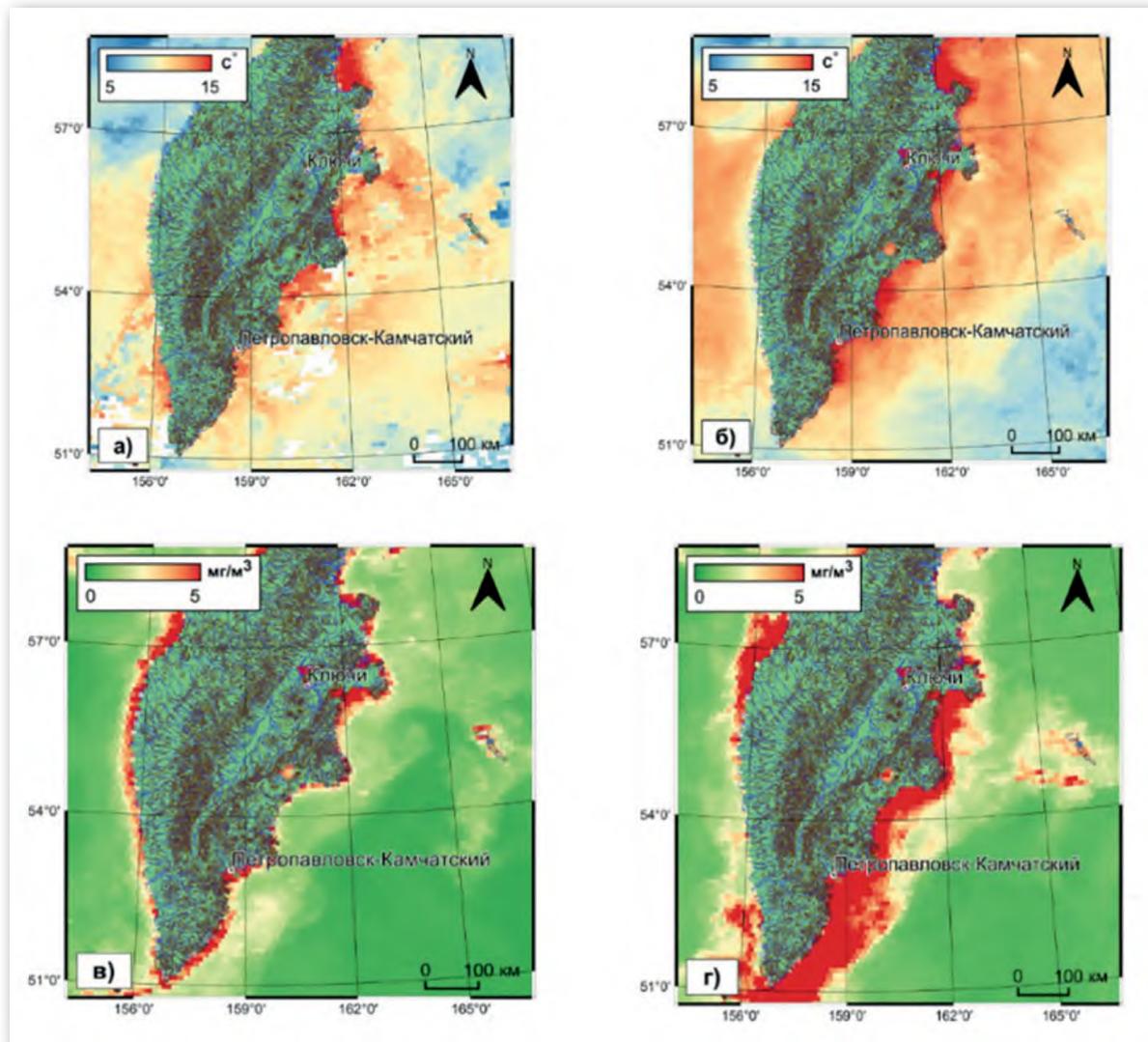


Рис. 11. Пространственные распределения осредненных значений температуры морской поверхности, а также концентрации хлорофилла-а в 2019 и 2020 гг. Температура морской поверхности в июле: а — 2019 г.; б — 2020 г.

Концентрации хлорофилла-а в сентябре: в — 2019 г.; г — 2020 г.

Для этого перспективно использование космических методов и средств [16]. Нами предложен метод дистанционного мониторинга тайфунов, позволяющий оценивать критические параметры водной и воздушной среды в зонах активного тропического циклогенеза, в том числе таких как: температура поверхности океана, температура воздуха на различных высотах, скорость ветра, влажность воздуха, уходящее длинноволновое излучение, параметры ионосферы, направление движения тайфуна и др. на основе комбинированного использования различных спутниковых и подспутниковых данных, который может быть использован для улучшения прогнозирования моментов их зарождения и направлений движения. На рис. 12 приведены траектории тайфунов в северо-западной части Тихого океана, построенные по спутниковым данным за 2023 и 3024 гг.

Основные параметры и энергия наиболее сильных тайфунов, обнаруженных из космоса в 2023 г. в северо-западной части Тихого океана, приведены в табл. 1.



Рис. 12. Траектории тайфунов в северо-западной части Тихого океана, построенные по спутниковым данным:
а — в 2023 г.; б — в 2024 г.

Таблица 1

Основные параметры и энергия наиболее сильных тайфунов, обнаруженных из космоса в 2023 г., в северо-западной части Тихого океана

Название тайфуна	Основные параметры		Энергия тайфунов, Дж
	Минимальное давление (гПа)	Максимальная скорость ветра (м/с)	
ХАНУН	930	48	$7,33 \times 10^{17}$
ЛАН	940	45	$5,25 \times 10^{17}$
МАВАР	900	58	$1,1 \times 10^{18}$
ДОСКУРИ	925	50	$8,50 \times 10^{17}$
САОЛА	920	53	$5,06 \times 10^{17}$
ТАЛИМ	970	30	$3,36 \times 10^{17}$

При оценке энергетических особенностей тайфунов применялись подходы, основанные на [16]:

- Использовании осредненных физических параметров тайфунов:

$$W_{\text{п}} = 0.25\pi\rho LR^2V^2 \approx 0.61R^2V^2*, \quad (1)$$

где V — скорость воздушных потоков в циклоне;

L, R — высота и радиус воздушного столба;

$\rho = 0.8 \text{ кг/м}^3$ — средняя плотность воздуха.

- Аккумулированной энергии тайфунов (*ACE*):

$$ACE = \sum_{i=1}^I (U_{\text{max}})_i^2, \quad (2)$$

где $(U_{\text{max}})_i$ — максимальная средняя скорость ветра в тайфуне в интервале времени i (за 6 часов);

I — общее количество интервалов времени.

- Интегральной кинетической энергии (*IKE*):

$$IKE = \int \frac{1}{2} \rho U^2 dV, \quad (3)$$

где ρ — средняя плотность воздуха;

U — средняя скорость ветра в тайфуне;

dV — единица объема.

- Энергии водяного пара рассчитываемой на основе измеряемого из космоса содержания водяного пара (1 мм водяного пара. соответствует $2,5 \times 10^{12} \text{ Дж/км}^2$).

Анализ табл. 1 показал, что энергия самого сильного тайфуна (МАВАР) составила величину $1,1 \times 10^{18} \text{ Дж}$. Это соответствует приблизительно энергии десятка двадцати мегатонных водородных бомб [16].

Заключение

1. Применение космических методов и технологий для мониторинга опасных природных явлений и катастроф приводит к улучшению их прогноза и предупреждения. Это снижает гибель людей, уменьшает экономический ущерб от них на миллиарды рублей ежегодно, а также способствует улучшению среды обитания и условий функционирования объектов социально-экономической сферы.

2. Для повышения эффективности применения методов ДЗЗ для решения таких задач необходимо кардинально увеличить отечественную группировку КА ДЗЗ.

3. В качестве основного критерия для оценки эффективности деятельности в этом направлении целесообразно использовать предотвращенный ущерб от различных чрезвычайных ситуаций.

4. Для развития новых методов и технологий дистанционного мониторинга с целью прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций необходимо сформировать специальный Федеральный проект в рамках Национального проекта «Космос».

5. Необходимо развивать образовательные программы для подготовки специалистов в области ДЗЗ и обработки больших потоков данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. IPCC Sixth Assessment Report. 2022.
2. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 676 с.
3. осударственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2024 году». МЧС России, 2024 г.
4. Бондур В. Г., Крапивин В. Ф., Савиных В. П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М: Научный мир, 2009. 692 с. 22 с. илл. ISBN978-5-91522-125-2.
5. Вклад академической науки в развитие космической отрасли. Научные сессии Общего собрания членов РАН и Общих собраний отделений РАН Апрель 2021 г. / Под ред. академика РАН А. М. Сергеева, академика РАН В. Г. Бондура и члена-корреспондента РАН А. А. Макоско. М.: Российская академия наук, 2022. 456 с. ISBN978-5-907366-70-1.
6. Научное обеспечение реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации: Научные сессии Общего собрания членов РАН и Общих собраний отделений РАН, ноябрь 2018 г.: в 2-х томах, Москва, 13–14 ноября 2018 г. Том 1, 508 С. Том 2, 632 С. / Под ред. академика РАН В. Г. Бондура и члена-корреспондента РАН А. А. Макоско. М.: Российская академия наук, 2019. ISBN978-5-907036-54-3.
7. Бондур В. Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
8. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. Н. Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. 312 с.
9. Бондур В. Г. Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35. DOI: 10.7868/S0205961415060032
10. Бондур В. Г., Зима А. Л., Феоктистова Н. В. Долговременный спутниковый мониторинг различных типов природных пожаров и эмиссий климатически активных газов и аэрозолей от них на территории России и ее крупных регионов // Исследование Земли из космоса. 2024. № 5. С. 19–34. DOI: 10.31857/S0205961424050021.
11. Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O. S., Zima A. L., Feoktistova N. V. Intense Wildfires in Russia over a 22-Year Period According to Satellite Data. Fire 2023, 6, 99. <https://doi.org/10.3390/fire6030099>.
12. Бондур В. Г., Воронова О. С. Определение зон вероятного возникновения сейсмических событий с использованием машинного обучения // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25. ES5003. DOI: 10.2205/2025es001055. EDN: IOGILW.
13. Bondur, V.G., Tsidilina M. N., Gaponova E. V., Voronova O. S., Gaponova M. V., Feoktistova N. V., Zima A. L. Satellite-Detected Anomalous Changes in Parameters of Various Geophysical Fields During Earthquakes of $6 \leq M \leq 7,8$ in Türkiye in February 2023 // Russian Journal of Earth Sciences, 2024. 24, ES4006, EDN: BRWHCY, <https://doi.org/10.2205/2024es000930>.
14. Бондур В. Г., Чимитдоржсиеv Т. Н., Дмитриев А. В., Дагуров П. Н. Оценка реактивации оползня на реке Бурея методами радарной интерферометрии // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 2. С. 37–43. DOI: 10.31857/S2686739722020025.
15. Bondur, V., Chernikova, V., Chvertkova, O., Zamshin, V. Spatiotemporal Variability of Anthropogenic Film Pollution in Avacha Gulf near the Kamchatka Peninsula Based on Synthetic- Aperture Radar Imagery // J. Mar. Sci. Eng. 2024, 12, 2357. <https://doi.org/10.3390/jmse12122357>.
16. Бондур В. Г., Крапивин В. Ф. Космический мониторинг тропических циклонов. М: Научный мир, 2014. с. 78 илл. ISBN978-5-91522-356-0.

**РЕДКИЕ КАТАСТОФИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ
ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА: МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ,
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И УЧЕТА РИСКОВ**

В. К. Гусяков¹, д-р физ.-мат. наук
1ФГБУН ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, Россия

**RARE CATASTORPHIC EVENTS IN THE NATURE:
METHODS OF IDENTIFICATION, FORECASTING
AND RISK MANAGEMENT**

V. K. Gusiakov¹, Dr. Sc.
1FRC ICT, Novosibirsk, Russia

В изучении природных катастроф важное значение имеет выход за рамки инструментальных наблюдений, ограниченных, как правило, последними 100–150 годами, выяснение истории подобных катастроф в историческом и недавнем геологическом прошлом. Использование многодисциплинарного подхода для анализа данных из различных областей наук приводит к появлению в каталогах катастрофических событий, значительно превосходящих по своему энергетическому масштабу и последствиям те, с которыми приходится иметь дело в настоящее время. В докладе приводятся примеры редких событий катастрофического характера, происходивших в историческом и недавнем геологическом прошлом во всех трех оболочках Земли (твёрдой, водной и воздушной).

In the study of natural disasters, it is important to go beyond the scope of instrumental observations, limited, as a rule, to the last 100–150 years, to clarify the history of such disasters in the historical and recent geological past. The use of a multidisciplinary approach to the analysis of data from various fields of science leads to the appearance in catalogs of catastrophic events that significantly exceed in their energy scale and consequences those with which we have to deal at present. The report provides examples of rare events of a catastrophic nature that occurred in the historical and recent geological past in all three shells of the Earth (solid, water and air).

Крупные природные катастрофы начала XXI в. (цунами 2004 г. в Индийском океане и 2011 г. в Японии, землетрясения 2008 г. в Сычуане и 2023 г. в Турции, ураган Катрина в 2005 г. в США, наводнение 2008 г. в Мьянмаре, взрыв вулкана Хунга-Тонга в январе 2022 г.) привлекли внимание правительственные органов, международных организаций, научной общественности и широкой публики к проблеме их предсказания и оценки возможных рисков. Эти природные катастрофы привели к десяткам тысяч человеческих жертв и почти триллиону долларов суммарного материального ущерба. Процессы глобализации, связанные с усложнением политических и экономических связей между государствами, ведут к тому, что даже катастрофы местного и регионального уровня, имевшие ранее ограниченное влияние, могут иметь глобальные последствия. Все это требует адекватного ответа от научного сообщества в плане развития методов оперативного и долгосрочного прогнозирования природных катастроф, оценок связанных с ними рисков и выработки рекомендаций по их снижению.

Важнейшее значение при этом имеет выход за рамки инструментальных наблюдений, ограниченных, как правило, последними 100–150 годами, выяснение истории подобных катастроф в историческом и недавнем геологическом прошлом, т. е. на масштабах сотен и тысяч лет. Например, самые длинные ряды наблюдений за температурой воздуха не превышают 150 лет. Инструментальные наблюдения за землетрясениями ведутся около

140 лет, при этом глобальный инструментальный каталог землетрясений оказывается возможным поддерживать только с 1904 г. Выход за эти временные рамки приводит к появлению в каталогах значительно более масштабных природных катастроф, сравнительно с зафиксированными приборными средствами. При этом в силу достаточно общего закона повторяемости катастроф, который носит степенной характер, увеличение временного интервала на порядок приводит к такому же увеличению энергетического масштаба катастрофических событий, т. е. чем больший интервал времени мы рассматриваем, тем более масштабную катастрофу можем ожидать.

Мега-наводнение в июле 1342 г. в центральной Европе («Потоп Святой Магdalены») затронуло бассейны рек Рейн, Майн, Дунай, Мозель, Молдова, Эльба, Везер. На них были разрушены почти все мосты, изменились русла, в Кёльне суда переносило через крепостные стены. Только в бассейне Дуная погибло более 6000 человек. Причиной этого сильнейшего наводнения стала холодная, малоснежная зима, за которой последовала необычно теплая весна, высушившая почву. Когда в июле начались сильные проливные дожди (в течение трех дней выпала почти полугодовая норма осадков), вся вода устремилась в реки, смывая за собой почву. Резкая деградация сельскохозяйственных угодий повлекла за собой голод и болезни и, возможно, способствовала быстрому распространению эпидемии «Черной смерти» 1348–1350 гг., унесшей не менее трети тогдашнего населения Европы.

«Бристольский потоп» 1607 г. на юго-западном побережье Англии унес жизни более 2000 человек. Он до сих пор остается самой крупной природной катастрофой на территории нынешней Великобритании. С современной точки зрения причиной этого наводнения была комбинация мощного штормового нагона, вызванного приходом шторма из Северной Атлантики с высоким (сизигийным) приливом, на фоне которого развилось явление метеоцунами. В результате около 450 км побережья в районе Бристольского залива оказалось залито водой с глубиной на урезе до 5–6 м, проникавшей вглубь суши до 1–2 км [1].

Самым сильным землетрясением, зарегистрированным на территории США за инструментальный период, является землетрясение в Сан-Франциско 18 апреля 1906 г. ($M=7,6$), при котором было разрушено или повреждено три четверти зданий города, под обломками которых погибло около 3 тыс. человек. Однако сильнейшими землетрясениями на территории США является серия четырех Нью-Мадридских землетрясений, произошедшая в штате Миссисипи в 1811–1812 гг., магнитуда (макросейсмическая) двух из которых достигала 8, а интенсивность сотрясений — XI баллов. Учет этой серии в оценках сейсмической опасности территории США приводит к появлению выраженного пятна повышенной опасности в центральной части на территории штатов Миссури и Миссисипи, фоновая сейсмичность которой находится на очень низком уровне. Другим примером редкого сейсмического события является десятибалльное Чарльстонское землетрясение 31 августа 1886 г. на восточном побережье США, магнитуда которого сейчас оценивается величиной 7,2. Возникновение столь сильного землетрясения на территории с низким уровнем современной сейсмичности создало проблему для проектировщиков первых атомных станций, строившихся на восточном побережье США в 1970-х гг., которая была разрешена путем приписывания такому событию большого (порядка 10–15 тыс. лет) периода повторяемости.

Одной из главных особенностей природных опасностей является большое разнообразие механизмов их возникновения и распространения. Например, подготовленная в 2013 г. издательством Springer «Энциклопедия природных опасностей» [2] содержит статьи о почти сотне их отдельных видов, затрагивающих все три главные оболочки Земли — твердую, водную и воздушную, а также приходящих из космического пространства.

При изучении природных опасностей и катастроф полезно более точно определить, что, собственно, понимается под этими терминами.

Природная опасность — геофизический фактор (параметр), контролирующий состояние окружающей среды, к среднему многолетнему значению которого адаптировано текущее состояние биосфера.

Природная катастрофа — резкое изменение (скачок) в значении одного из геофизических параметров, контролирующих состояние окружающей среды, который вызывает отклик в биосфере, наносящий ущерб населению и инфраструктуре и требующий проведения защитных/восстановительных мероприятий.

В данных определениях ключевым элементом является фиксация наличия отклика в биосфере. В соответствие с этим, если на планете отсутствует биосфера, то на ней не может быть катастрофических явлений. Так, например, на Луне процесс образования реголита (лунного грунта) в результате импактного кратерообразования является нормальным геологическим процессом. Равным образом, падение на Юпитер даже такого крупного небесного тела, как комета Шумейкера-Леви, ведет лишь к увеличению общей массы этого газового гиганта.

Список геофизических параметров, контролирующих состояние окружающей среды, является весьма широким. Важнейшими из них являются уровень освещенности, температура и скорость движения воздуха, количество атмосферных осадков, уровень ускорения почвы, уровень моря (для береговых экосистем), уровень подземных вод (в некоторых районах), пылевая нагрузка на почву и др. К примеру, современный рельеф земной поверхности и морского дна адаптированы к практически нулевому уровню ускорения почвы. Внезапное скачкообразное изменение этого параметра в момент землетрясения приводит к резким изменениям форм рельефа, что выражается в виде возникновения многочисленных оползней и обвалов на суше, подводных оползней, мутевых и турбидитных потоков на морском дне. Подлинные масштабы распространенности этого явления начали выясняться только в самое последнее время, с привлечением средств дистанционного зондирования (спутниковых снимков) для идентификации мест возникновения постсейсмических оползней. Так, например, после Непальского землетрясения 25 апреля 2015 г. ($Mw = 7,8$) на спутниковых снимках было идентифицировано более 10 тыс. обвалов, оползней и снежных лавин, включая лавину, убившую 22 альпиниста в базовом лагере на Эвересте. После Сычуаньского землетрясение 12 мая 2008 г. в Китае ($Mw = 7,9$) в горах было идентифицировано более 100 тыс. оползней и 257 руслоных дамб, перегородивших горные водотоки [3].

Тремя главными проблемами, связанными с изучением природных опасностей, являются: (1) идентификация и классификация; (3) параметризация; (3) каталогизация.

Идентификация и классификация ПО возможна по: (1) типу источника (внутри Земли, в водной оболочке, в воздушной оболочке, вне Земли); (2) среде возникновения и распространения (твёрдая, водная, воздушная оболочки); (3) поражающим факторам (молния — сила тока и напряженность эл. поля, землетрясения — ускорение почвы, вулканы — широкий спектр факторов, от запыленности атмосферы до погребения под горячей лавой).

По типу и местонахождению источника природные (геофизические) опасности могут быть разделены на следующие основные группы:

- геологические опасности (землетрясения, вулканы, оползни и обвалы, карстовые провалы, взрывные воронки);
- океанографические опасности (штормы, штормовые нагоны, изменения уровня, цунами);
- метеорологические опасности (тайфуны и ураганы, торнадо, шквалы, грозы, ливни, град, волны тепла);

- гидрологические опасности (наводнения, снежные лавины, движение ледников);
- опасности, связанные с растительным покровом или его отсутствием (природные пожары, пыльные бури, опустынивание);
- космические опасности (падения космических тел на Землю, солнечные вспышки, взрывы сверхновых).

Параметризация требует, прежде всего, наличия шкал измерений общего энергетического масштаба опасного явления, интенсивности его локальных проявлений и нанесенного ущерба. В наиболее полно разработанном виде такие шкалы существуют для землетрясений — шкала магнитуд (M1, Ms, Mw) и шкала интенсивности (балльности) сотрясений MSK-64. Для многих других видов природных опасностей, в частности, для наводнений и паводков, вносящих весьма существенный вклад в общую статистику жертв ПК, подобные шкалы до настоящего времени отсутствуют вовсе.

Каталогизация ПО требует создания возможно более длинных (по времени) и представительных (по пространству) каталогов и баз данных, без наличия которых невозможен ни оперативный, ни долгосрочный прогноз. Никакое моделирование, в том числе вероятностное, не может заменить отсутствие длинных рядов наблюдений.

В тексте расширенных тезисов доклада невозможно дать даже очень краткий обзор всего разнообразия природных опасностей, каждая из которых имеет потенциал для превращения в природную катастрофу. Поэтому здесь мы ограничимся кратким обзором их временных, пространственных и энергетических масштабов (рис. 1).

Временной масштаб ПК покрывает по меньшей мере девять порядков и простирается от одной секунды до десятков лет. На левом конце временной шкалы находятся



Рис. 1. Схематическое представление временных, пространственных и энергетических масштабов природных катастроф

такие природные опасности как молнии и падения метеоритов (характерная длительность этих явлений — от 1 до 10 с), на правом — засухи, продолжительность которых может достигать десятков лет.

Пространственный масштаб ПК охватывает не менее шести порядков. На левом конце этой шкалы также находятся молнии и падения метеоритов (диапазон воздействия от 1 до 10 м), к которым примыкают оползни и обвалы (десятки и сотни метров). Правый конец пространственной шкалы охватывает, по сути, все нашу планету и может реализоваться при катастрофах, вызванных вулканическими мега-извержениями и астероидными ударами. Сюда же следует отнести и глобальное потепление, безотносительно причин, его вызвавших.

Наиболее широким (до 15 порядков) является энергетический диапазон ПК, который, собственно, и определяет масштаб их воздействия на биосферу. Он простирается от 10^8 — 10^9 Дж (средняя молния) до 10^{22} — 10^{23} Дж (порог глобальной катастрофы, вызванной, например, падением километрового астероида). По-видимому, на всем протяжении энергетической шкалы действует степенной закон повторяемости ПК, говорящий о том, что с понижением энергетического порога происходит увеличение частоты повторяемости опасных природных явлений. Так, например, опасных событий с наименьшим порогом (молнии) происходит несколько миллионов в год, в то время как предельно сильное событие (падение километрового астероида) происходит примерно раз в миллион лет. Последнее такое падение случилось около 800 тыс. лет назад и привело к возникновению крупного (диаметром 15 км) кратера в южном Лаосе, скрытого сейчас под лавовым полем. По-видимому, именно этот кратер послужил источником Австралио-Азиатского тектитового поля, самого крупного на Земле. Интересно отметить, что по данным недавних генетических исследований именно в этот период (около 800 тыс. лет т. н.) вид *Homo Sapience* прошел через «бутылочное горлышко», уменьшившее его численность на 98,7%, что фактически поставило его на грань вымирания [4].

Говоря об энергетических и пространственных масштабах природных катастроф, следует, хотя бы коротко упомянуть три наиболее масштабных катастрофы, произошедших на протяжении голоцена и имевших значительные климатические, экологические и исторические последствия:

- 12 780 лет т. н.— катастрофическое похолодание Молодого Дриаса, исчезновение культуры Кловис, вымирание мега-фауны северной Америки и Евразии [5].
- 2354—2345 гг. до н. э.— катастрофа «Великого Потопа», отголоски которой дошли до нас не только в виде мифов и легенд, но и виде дендрохронологических аномалий и седиментологических свидетельств (катастрофные слои в толщах озерных и болотных осадков) [6].
- 536—540 гг. н. э.— наиболее крупная климатическая катастрофа (environmental downturn) исторического времени, имевшая глобальный характер и масштабные социальные, экономические и исторические последствия [7].

Практическая значимость изучения природных катастроф состоит прежде всего в направленности на снижение возникающих рисков, то есть на решение двух главных научно-прикладных задач: (1) оперативный прогноз и предупреждение органов власти и населения по факту возникновения предвестников или фиксации ранней стадии развития явления; (2) долгосрочная оценка опасности, т. е. районирование территории по степени опасности, которое в настоящее время может выполняться только на вероятностной основе.

На постоянной основе, обеспеченной соответствующей нормативной базой, оперативный прогноз сейчас реализован только для некоторых видов природных опасностей, таких как цунами, ураганы, паводки. Долгосрочный прогноз в наиболее полной мере реализован для оценки сейсмической опасности, причем во многих

странах это делается на законодательной основе, часто на всех трех уровнях — национальном, региональном и локальном.

Основной проблемой оперативного прогноза является оптимальный выбор порогового значения параметра, по которому осуществляется прогноз. Именно он определяет соотношение оправдавшихся, пропущенных и ложных тревог. Если «цена» пропущенной тревоги является высокой (как в случае цунами или землетрясения), работоспособная схема оперативного прогноза может быть достигнута только за счет достаточно высокого соотношения ложных и оправдавшихся тревог (порядка 80:20). Для прогноза цунами такая теоретическая оценка была дана еще в 1972 г. [8] и впоследствии полностью подтвердилась анализом статистики тревог, выпущенных в период 1958–2009 гг.: при отсутствии случаев пропусков сильных цунами 75% выпущенных тревог оказались ложными, т. е. цунами оказалось слабым, не требующим проведения защитных мероприятий (вывода судов из портов и эвакуации населения) [9].

Это имеет место даже при наличии достаточно высокой детерминированной корреляции между прогнозическим признаком и прогнозируемым параметром (например, магнитуда подводного землетрясения — высота цунами на берегу). Если такой прямой корреляции нет, то типичное соотношение оправдавшихся/ложных/пропущенных тревог выглядит как 40:30:30. При таком соотношении практически невозможно построить какой-либо работоспособный (работающий в режиме 24/7) регламент службы предупреждения.

Завершая краткий обзор проблематики природных опасностей и катастроф, можно сделать следующие выводы:

Природные катастрофы становятся одним из существенных факторов, влияющих на развитие современного общества. Основной фактор здесь — стремительный рост уязвимости технологически развитого общества к воздействию природных факторов при постоянном росте экспозиции (суммы материальных ценностей и людских ресурсов, подверженных действию опасных природных явлений).

В настоящее время оперативный прогноз возможен только для некоторых видов природных катастроф (циунами, ураганы, паводки). Его надежность и достоверность в сильной степени зависят от инструментальной обеспеченности наблюдений (мониторинга в реальном времени), а эффективность — от выбранного соотношения оправдавшихся и ложных тревог к пропущенным событиям.

Долгосрочный прогноз (районирование территории по степени опасности) требует длинных рядов наблюдений, далеко выходящих за пределы инструментального периода и разработки рациональных методологических основ вероятностного прогнозирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Haslett S. K., Bryant E. A.* Meteorological tsunamis in southern Britain: an historical review // Geogr Rev. 2009. 99 (2). 146–163.
2. *Bobrowsky P. T.* Encyclopedia of Natural Hazards. 1st ed. 2013., Springer Netherlands, 2013. 1133 pp.
3. *Gorum T. et al.* Geomorphology. 2011. P. 152–167.
4. *Hu W., Hao Z., Du P. et al.* Genomic inference of a severe human bottleneck during the Early to Middle Pleistocene transition // Science. Vol 381. 6661. Pp. 979–984.
5. *Firestone R., West A., Warwick-Smith S.* The Cycle of Cosmic Catastrophes: Flood, Fire, and Famine in the History of Civilization, 2006. 392 pp.
6. *Baillie M.* Exodus to Arthur. London, 1999, 272 pp.
7. *Keys D.* Catastrophe: an investigation into the origins of the modern world. New York, Ballantine Publishing Group, 1999. 343 pp.
8. *Соловьев С. Л.* Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океане // Труды СахКНИИ 1972. Вып. 29. С. 7–47.
9. *Гусяков В. К.* Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958–2009 гг. // Сейсмические приборы. 2010. № 3.

ОПИСАНИЕ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАМКАХ НЕЛОКАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА

Т. А. Хантулева^{1,2}, докт. физ.-мат. наук,
А. А. Родионов², чл.-корр. РАН

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

DESCRIPTION OF CATASTROPHIC PHENOMENA WITHIN THE FRAMEWORK OF NONLOCAL TRANSFER THEORY

T. A. Khantuleva^{1,2}, Doct. Phys.-Math. Sc.,
A. A. Rodionov², Corr. Memb. RAS

¹Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

Опасные природные явления и катастрофы наносят значительный урон человеческому обществу, экономике стран и экологии. Их прогноз позволяет предвидеть негативное развитие природных процессов и вовремя защитить население и важную инфраструктуру. Однако уравнения механики сплошной среды не описывают течения и деформации при больших градиентах термодинамических характеристик и больших силовых нагрузках. Поэтому для прогнозирования катастроф предлагается использовать нелокальную теорию переноса. На примере модельной задачи показаны возможности частичного управления волново-вихревыми процессами.

Natural hazards and disasters cause significant damage to human communities, economies, and the environment. Forecasting them allows us to anticipate the negative development of natural processes and promptly protect the population and critical infrastructure. However, the equations of continuum mechanics do not describe flows and deformations under large gradients of thermodynamic properties and high force loads. Therefore, it is proposed to use nonlocal transport theory to predict disasters. A model problem is used to demonstrate the potential for partial control of wave-vortex processes.

В математике под катастрофой понимают такой процесс, при котором возникают скачкообразные изменения системы в ответ на плавное изменение внешних условий. В общем случае из непрерывных полей вдруг в системе формируются дискретные структуры. Такие резкие и неожиданные изменения в системе происходят из-за того, что катастрофические изменения являются следствием процессов, которые могли происходить совсем в другом месте и задолго до катастрофы. Такое разделение причины и следствия в пространстве и времени указывает на глубокие нелокальные связи в системе и долгую память об истории воздействий на нее. Это означает, что нелокальность и запаздывание являются неотъемлемыми атрибутами катастрофических процессов. Помимо этого, такие процессы характеризуются сильной нелинейностью и многовариантностью, что приводит к неопределенности и неизбежно вносит вероятностный характер в их протекание. В свою очередь нелокальность порождает коллективные эффекты, которые приводят к самоорганизации новых структур в системе. Между структурой системы и ее реакцией на внешнее воздействие формируются обратные связи, делающие поведение системы очень сложным.

Сильнонеравновесные процессы переноса включают самоорганизацию, турбулентность, формирование мезоскопических структур, процессы в живых системах и, несмотря на кажущееся различие, тесно связывают их друг с другом. Проблема математического

описания процессов в макроскопических системах вдали от локального термодинамического равновесия остается важнейшей нерешенной проблемой современной механики. Ее невозможно решить без привлечения таких смежных дисциплин как статистическая физика, синергетика, теория информации и теория управления адаптивными системами.

Еще во второй половине прошлого века в рамках неравновесной статистической механики Д. Н. Зубарев [1] из первых принципов доказал, что вдали от равновесия макроскопические уравнения переноса не могут быть локализованы ни в пространстве, ни во времени. Характерной особенностью нелокального описания является сохранение в обобщенных макроскопических уравнениях переноса интегральной информации о системе при описании ее локальных свойств. Из полученных Зубаревым нелокальных и запаздывающих соотношений между термодинамическими силами \mathbf{X} и потоками \mathbf{P} вытекают интересные следствия относительно поведения энтропии вдали от равновесия. Было доказано, что в сильннеравновесном процессе уровень энтропии может колебаться, и в некоторых областях системы производство энтропии может стать отрицательным за счет возникновения новой информации при самоорганизации новой структуры [2]. Это не противоречит второму началу термодинамики, поскольку при релаксации системы к локальному равновесию полная энтропия все равно возрастет (рис. 1).

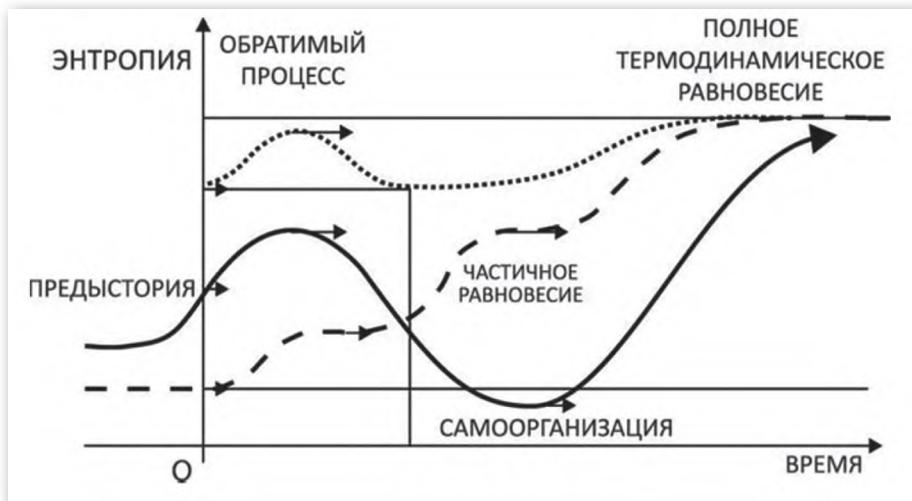


Рис. 1. Поведение энтропии вдали от равновесия

На основе нелокальных и запаздывающих уравнений переноса, полученных методами неравновесной статистической механики, была разработана самосогласованная нелокальная теория неравновесных процессов переноса, которая является принципиально новым, универсальным и экономичным способом описания комплекса процессов переноса в открытых системах [3, 4]. В отличие от статистико-механического описания, включающего два масштабных уровня — микро- и макроскопический, новая теория через корреляционные функции $K(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t', \mathbf{s})$ подключает мезоскопический масштаб, на котором и происходит эволюция системы вдали от термодинамического равновесия.

$$P(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^t dt' \int_V d\mathbf{r}' K(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t', \mathbf{s}) X(\mathbf{r}', t') \xrightarrow{s \rightarrow 0} k \mathbf{X}(\mathbf{r}, t). \quad (1)$$

Здесь \mathbf{s} — вектор, характеризующий масштабы пространственных корреляций, а также характерное время их существования. В предельном случае при $\mathbf{s} \rightarrow 0$, когда

пространственно-временные корреляции затухают, определяющие термодинамические соотношения переходят в локальные соотношения линейной термодинамики (1).

В работах [3, 4] утверждается, что даже без знания явного вида неравновесных корреляционных функций можно построить модели нелокальных термодинамических соотношений между силами и потоками, которые позволяют замкнуть нелокальное описание неравновесных процессов. Показано, что в процессе сглаживания градиентов макроскопических полей за счет интегрирования в соотношениях (1) в системе будут формироваться динамические структуры в виде кластеров с практически одинаковыми значениями макроскопических плотностей. Кластеры конечного размера движутся как почти твердые частицы, которые могут взаимодействовать и вращаться. Модельное асимметричное распределение пространственных корреляций конечного размера на конечных интервалах времени порождается интенсивным взаимодействием движущейся среды с межфазными границами, которое в свою очередь приводит к развитию турбулентности. На рис. 2 схематично показаны предельные случаи нелокальных корреляций (ε, γ — параметры пространственной нелокальности корреляции), t_R — время действия приложенной силы, t_r — время релаксации напряжения).

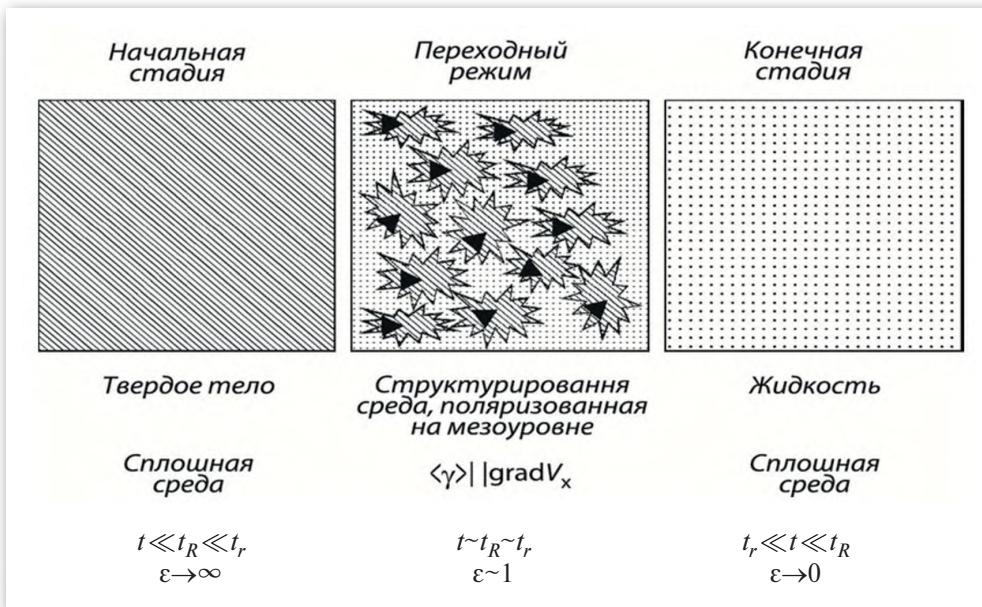


Рис. 2. Предельные случаи нелокальных корреляций

Поскольку любое возмущение в среде распространяется с конечной скоростью, которая связывает пространственные и временные переменные в единый комплекс, моделирование эффектов запаздывания связано с волновым переносом импульса и энергии. В результате построена нелокальная модель с памятью, которая при коротком нагружении системы индуцирует волновые процессы, а при длительном нагружении формирует гидродинамическое течение, сопровождаемое диссипацией механической энергии в тепло. В переходном режиме носителями импульса и энергии являются гауссовые волновые пакеты мезоскопического масштаба [5]. В зависимости от длительности и интенсивности внешнего воздействия, а также начальных свойств среды из нелокальной модели с памятью можно получить все известные упругопластические и гидродинамические модели среды. В отличие от аддитивных моделей механики сплошной среды нелокальная модель изменяется вместе со средой при увеличении длительности нагрузки и изменении размера носителей импульса и энергии. Основная трудность

исследования сильнонеравновесных процессов заключается в том, что вдали от равновесия состояния физической системы быстро эволюционируют в направлении более устойчивых при данных условиях состояний за счет формирования внутреннего управления посредством обратной связи между структурой, ее эволюцией и изменением макроскопических свойств системы.

В рамках нелокальной теории переноса временная эволюция системы вдали от локального равновесия описывается кибернетическими методами, разработанными в рамках теории управления адаптивными системами с обратной связью [6]. Целью эволюции в соответствии с принципом максимальной энтропии Джейнса [7] выбрана максимизация полного производства энтропии в системе при наличии наложенных на систему ограничений. Для описания наискорейшего пути эволюции выбран алгоритм скоростного градиента [6], в котором в качестве параметров управления берутся параметры структуры $s(t)$. Включенный в математическую модель контур внутреннего управления между эволюцией структуры и поведением системы при задании начальных значений параметров замыкает постановку задачи моделирования неравновесных процессов. Проследивая траектории эволюции динамических структур в неравновесных процессах, такой алгоритм позволяет прогнозировать будущие изменения состояния системы, в том числе катастрофические процессы.

Пока теоретики будут использовать «жесткие» модели сложных, быстро меняющихся процессов в отрыве от возможности параллельного исследования эволюции связанных с этими процессами информационных структур («мягкие» модели [8]), преодолеть разрыв между возможностями фундаментальной науки и практическими потребностями не удастся.

Статья подготовлена в рамках госзадания FMWE-2024-0028.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубарев Д. Н. Неравновесная статистическая термодинамика. М.: Наука. 1971. 390 с.
2. Климонтович Ю. Л. Энтропия и информация в открытых системах // Успехи физ. наук. 1999. Т. 169, № 4. С. 443–452.
3. Хантулева Т. А. Нелокальная теория неравновесных процессов переноса. СПб.: СПбГУ, 2013. 273 с.
4. Kvantuleva T. A. Mathematical Modeling of Shock-Wave Processes in Condensed Matter. From Statistical Thermodynamics to Control Theory. Springer Nature Singapore. 2022. 336 p.
5. Хантулева Т. А., Мещеряков Ю. И., Коновалов Г. В. и др. Нелокальная механика переноса в динамически деформируемой среде // Волновая концепция мезоуровня. Физическая мезомеханика. 2024. Т. 27. № 6. С. 55–75.
6. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах. М.: Наука. 1990. 292 с.
7. Jaynes E. The Maximum Entropy Formalism. MIT: Cambridge, 1979.
8. Арнольд В. И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели. М.: МЦНМО, 2004, 32 с.

КАСКАДНОСТЬ ВЗАИМНЫХ ВОЗНИКОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ — РЕЗУЛЬТАТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

С. Г. Ивахнюк¹, канд. техн. наук

¹Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

CASCADING OF MUTUAL OCCURRENCE AND DEVELOPMENT OF EMERGENCY SITUATIONS — THE RESULT OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL PROGRESS

S. G. Ivakhnyuk¹, PhD

¹Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia,
Saint-Petersburg, Russia

Приведено обоснование каскадных сценариев взаимного перехода ЧС одного вида в другие. Предложена новая графическая трактовка каскадного развития ЧС — «треугольник ЧС». Обсуждены перспективы применения разработанной модели «пространства ЧС» — информационного массива, формируемого с использованием нейросетевых технологий в целях анализа и интерпретации информации, а также установления причинно-следственных связей и прогнозирования ЧС.

Substantiation of cascade scenarios of mutual transition of emergencies of one type to another is provided. A new graphic interpretation of the cascade development of an emergency is proposed — the «emergency triangle». The prospects for using the developed model of «emergency space» — an information array formed using neural network technologies for the purpose of analyzing and interpreting information, as well as establishing causal relationships and predicting emergencies — were discussed.

В соответствии с воззрениями ряда видных ученых, в том числе основоположника теории экономических циклов Н. Д. Кондратьева, кризисы, войны и революции определяются, в первую очередь, сменой технологических укладов [1]. Из этого следует, что попытки реализации прорывных научноемких технологий неотвратимо будут сопровождаться возникновением и развитием различных чрезвычайных ситуаций (ЧС), в том числе и биолого-социальных чрезвычайных ситуаций (БСЧС), к которым ряд исследователей относит массовые акции протesta, акты экстремизма и терроризма, а также военные конфликты.

Предпринятая попытка систематизации и установления связи этапов развития научно-технического прогресса с возникновением и взаимными трансформациями различных видов ЧС [2] позволила предложить новые сценарии возникновения и развития ЧС и разработать новый дидактический подход к объяснению их генезиса и взаимодействия.

Проанализированные данные об имевших место ЧС и их последствиях четко формируют тезис о том, что крупномасштабные природные чрезвычайные ситуации (ПЧС), например, лесные пожары, наводнения, землетрясения, как и техногенные чрезвычайные ситуации (ТЧС), вызывают отклик в виде различных социальных проявлений — от протестных акций населения до актов экологического и политического терроризма и, наоборот.

Действительно, проведение анализа предвестников и последствий любого типа ЧС позволяет утверждать, что любое из них может стать своеобразным ключом, «триггером» для взаимного каскадного перехода, о чем свидетельствуют резонансные события последних лет.

Примером может послужить разгерметизация топливного резервуара (ТЧС) в Кайеркане (г. Норильск) в 2020 г. Согласно итогам расследования к подвижности свай и оседанию конструкции резервуара привело таяние вечной мерзлоты (ПЧС). Широкий общественный резонанс, несмотря на подробную и объективную подачу в СМИ, вызвал у прозападно настроенных российских политиков и изданий желание привлечь «Гринпис» и «Беллону» в попытке «раскачать» ситуацию до уровня массовых социальных протестов (БСЧС).

Также можно привести в пример горение и тление торфяников (ПЧС), причиной которых зачастую служат просчеты при реализации мелиоративных мероприятий, приведших к переосушению болот (ТЧС). Все это накладывается на «плодородную почву», когда любой негативный информационный повод масштабируется и распространяется среди определенных социальных групп, вплоть до призыва «под знамена» несогласованных митингов и пикетов (БСЧС).

Другим примером могут стать милитаризованные террористические атаки на гражданские объекты хранения нефтепродуктов в приграничных с Украиной областях (БСЧС). Повреждения, причиненные резервуарам, послужили причиной поступления токсичных компонентов нефтяных углеводородов в окружающую среду (ТЧС), негативное воздействие которых приведет к разрушению сложенных взаимодействий внутри сформировавшихся биоценозов, на что рано или поздно последует ответная реакция природы (ПЧС).

Попытка мысленного размещения трех основных типов ЧС в вершинах треугольника и анализа их возможного взаимодействия обнаруживает верность новой графической трактовки каскадного развития и взаимной трансформации ЧС в виде «треугольника ЧС» (рис. 1а).

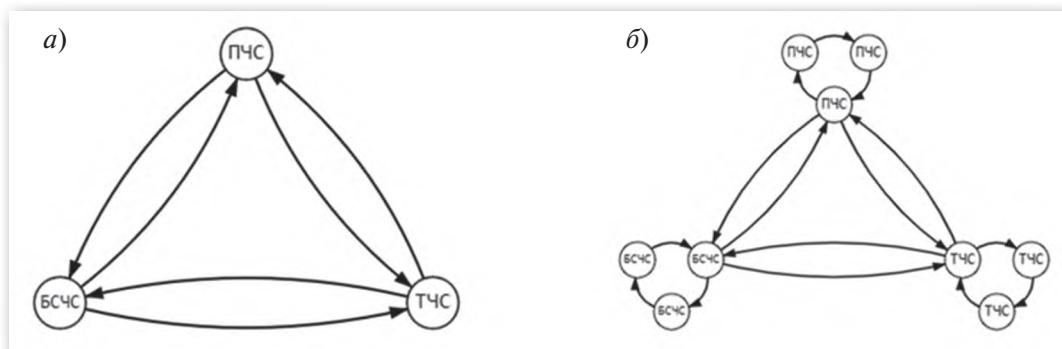


Рис. 1. Графическая интерпретация процессов возникновения и взаимной трансформации различных видов ЧС

Стоит отметить, что различные виды ЧС способны не только взаимно трансформироваться, но и «клонировать» себе подобных. Так тление торфяников может привести к возникновению лесного пожара; террористический акт в отношении представителей конкретной религиозной конфессии незамедлительно вызывает вооруженный ответ; аварийный выброс облака топливно-воздушной смеси в цеху одного предприятия может привести к его взрыву на территории другого. В связи с изложенным графическая интерпретация процессов возникновения и взаимной трансформации различных видов ЧС может быть модернизирована в виде, представленном на рис. 1б.

Представленные на рис. 1 и 2 визуализации новой дидактической модели возникновения и взаимной трансформации различных видов ЧС в виде графа-«треугольника ЧС» («emergency triangle») логически доступны для понимания и устанавливают причинно-следственные связи в их каскадном развитии.

Действительно, ведь одна ЧС способна оказать влияние на каскадный генезис других не только в текущем временном интервале или одной территориальной локации. Так, например, технологию добычи сланцевой нефти можно рассматривать как ТЧС, результатом которой через десятки лет станут экологические деформации — предвестники ПЧС, которые, несомненно, приведут к БСЧС.

Перспективы широкого применения разработанной модели усматриваются в построении «пространства ЧС» («emergency space»), представляющего собой структурированный массив данных о ЧС, формируемый с использованием технологий Больших данных (BigData) в целях анализа, интерпретации информации, установления причинно-следственных связей и прогнозирования с применением нейросетевых технологий.

Принцип формирования «пространства ЧС» основывается на построении связей как внутри треугольников ЧС, так и между ними. Ведь одна ЧС может оказать влияние на генезис другой не только в одном временном интервале или территориальной локации. На настоящем этапе массив данных представляется в виде двумерного пространства, визуализированного на рис. 2.

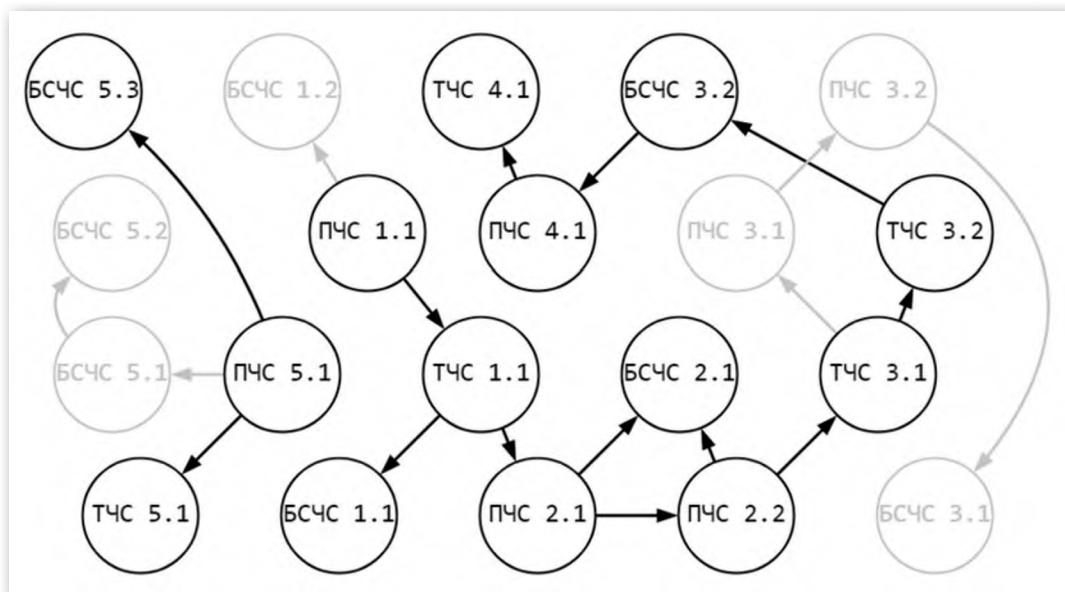


Рис. 2. Двумерное представление «пространства ЧС»

При формировании «пространства ЧС» предлагается исходить из гипотезы, что причинно-следственные связи внутри и между «треугольниками ЧС» не условно возможны, а объективно существуют. Вероятно, некоторые из них остаются либо не замеченными специалистами, например, по причине низкой общественной активности или засекреченности, либо «спящими», проявления которых мир ощутит спустя годы (обозначены на рис. 2 серым цветом). Именно их своевременное выявление и прогнозирование спасет планету от будущих катастроф.

В качестве примера можно привести аварию на АЭС Фукусима (ТЧС), причиной которой стало цунами вследствие землетрясения (ПЧС). Эта авария спустя много лет вызывает активизацию протестов в разных странах (БСЧС), как реакцию на сброс три-тий- и цезийсодержащего водного теплоносителя в океан, вызывающего различные ПЧС во всем Мировом океане в результате разноса течениями. Графическая визуализация описанных событий с применением концепции «пространства ЧС» представлена на рис. 3.

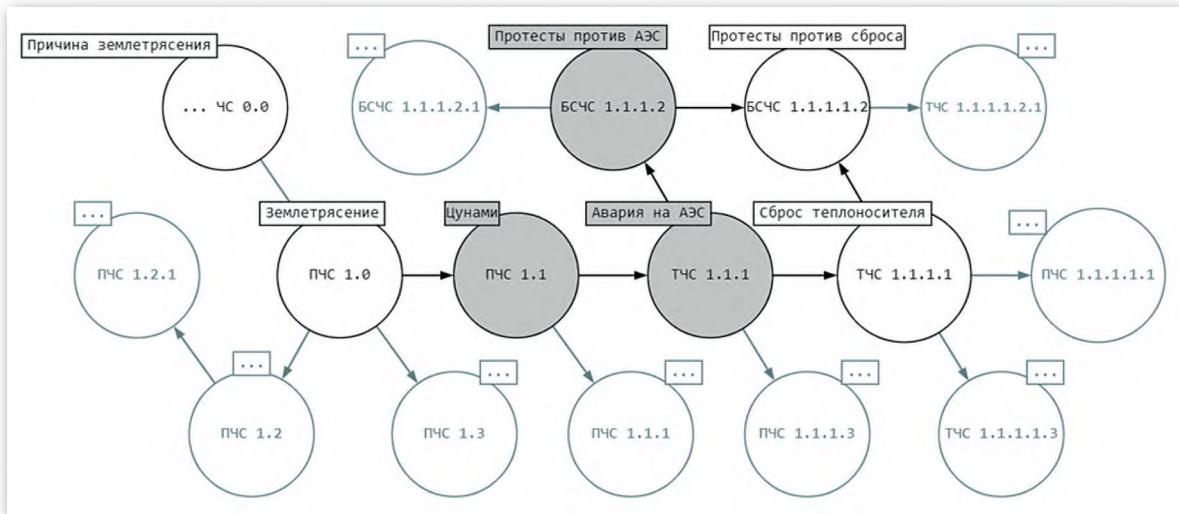


Рис. 3. Визуализация сценариев каскадного развития ЧС на примере аварии на АЭС Фукусима

Процесс формирования Больших данных имеет начало, но не имеет конца. Они создаются из «ядра» первоначальных данных и развертываются во времени во всех направлениях. Принятие за отправные точки первых выявленных природных и техногенных ЧС, фиксация в хронологическом порядке по принципу «домино» последующих аварий и природных катализмов, их негативных проявлений и развития обеспечат, с учетом концепции «треугольника ЧС», специальному программному обеспечению значительные преимущества в вопросе прогнозирования ЧС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев Н.Д. Избранные сочинения. М.: Экономика, 1993.
2. Ивахнюк С. Г. Каскадность взаимных возникновения и развития чрезвычайных ситуаций — результат научно-технического прогресса // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 1 (61). С. 67–77.

ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОПЕРАТИВНОМ ПРОГНОЗЕ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

Г. И. Долгих¹, акад. РАН

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильинчёва ДВО РАН,
Владивосток, Россия

LASER INTERFERENCE TECHNOLOGIES IN THE OPERATIONAL FORECAST OF NATURAL DISASTERS

G. I. Dolgikh¹, acad. RAS

¹V.I. Illyichev Pacific Oceanological Institute,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Обсуждаются перспективы применения лазерно-интерференционного комплекса, состоящего из лазерных деформографов, лазерного нанобарографа и лазерных измерителей вариаций гидросферного давления, в оперативном прогнозе геосферных природных катастроф. Продемонстрированы натурные данные по регистрации лазерными деформографами деформационных аномалий, вызванных смещениями морского дна при образовании цунами, на практически любых планетарных расстояниях. Комплексное применение всех указанных установок позволяет определить особенности возникновения, развития и трансформации геосферных процессов.

The prospects of using a laser interference complex consisting of laser strainmeters, a laser nanobarograph, and laser meters of hydrosphere pressure variations in the operational forecast of geospheric natural disasters are discussed. Full-scale data on the registration by laser strainmeters of deformation anomalies caused by displacements of the seabed during the formation of tsunamis at almost any planetary distances are demonstrated. The complex application of all these installations makes it possible to determine the features of the origin, development and transformation of geospheric processes.

Основное внимание в оперативном прогнозе природных катастроф в Российской Федерации уделяется землетрясениям, цунами, тропическим циклонам как наиболее опасным природным явлениям, приносящим наибольший экономический и социальный ущерб нашей стране. Почти аналогичная ситуация складывается с данными катастрофами и в остальных странах, особенно в странах, расположенных в Тихоокеанском и Индонезийском регионах планеты.

Судя по человеческим потерям, цунами можно отнести к самым опасным природным катастрофам, приносящим также значительный экономический ущерб. В РФ краткосрочный прогноз цунами строится по сейсмологическому принципу, при котором по величине магнитуды землетрясения, превышающей установленное пороговое значение, которое различается для разных цунамигенных зон, формируется сообщение о вероятности возникновения цунами. Такой подход, основанный на «магнитудно-географическом принципе» [1], прост и довольно эффективен: по крайней мере он обеспечивает небольшое количество пропусков цунами, которые возникают при меньших магнитудах землетрясений. Более современный подход строится на дополнительном использовании данных распределённой сети GPS и DART систем [2–4]. Полученную информацию о цунами и вызвавшему его землетрясению можно уточнять по данным цифровой сейсмометрии и спутниковой радиолокационной альтиметрии [5]. Но данные методы обладают различными недостатками. Так для «магнитудно-географического» принципа возможны пропуски цунами и выдача ложных тревог. Кроме того, применение данного метода не позволяет даже теоретически предсказать величину цунами. Системы,

использующие данные сети DART, получают слишком поздно информацию, по которой можно ориентироваться при осуществлении противоцунамиопасных мероприятий. Метод, описанный в работе [5] даёт не лучшие результаты, чем «магнитудно-географический» принцип. По полученным данным выполняются теоретические оценки величины смещения морского дна в месте генерации цунами, которые приводятся на сайте Американской геофизической службы [6]. Результаты расчётов помещаются на сайт с большим временным запаздыванием по сравнению со временем прихода цунами в ближайшие регионы очага землетрясения, что не позволяет с достаточной точностью определить высоту цунами для конкретных акваторий. Поэтому все Мировые службы предупреждения цунами получают свои модельные оценки на основе информации о магнитуде, глубине моря/океана, глубине корового землетрясения и его координатах. Как правило эти оценки по высоте волны цунами сильно отличаются от реальных.

Первая информация о возможности применения лазерно-интерференционных технологий для регистрации деформационных аномалий, вызванных подвижками морского дна в месте генерации будущей цунами, была опубликована в статье [7]. Данная деформационная аномалия была зарегистрирована лазерным деформографом на расстоянии около 6000 км от места возникновения, ее величина в месте регистрации составила 59,3 мкм на базе 52,5-метрового лазерного деформографа. Время распространения деформационной аномалии от места генерации до лазерного деформографа составило 19 мин 54 с, а первая волна цунами в Индийском океане пришла к берегу через 2 часа после её возникновения. В дальнейшем данный деформационный метод краткосрочного прогноза цунами был развит для остальных регионов планеты при рассмотрении зарегистрированных сигналов, приходящих от цунамигенных землетрясений в Японском, Индонезийском, Латиноамериканском и Североамериканском регионах на расстояниях до 17000 км. По полученным данным лазерных деформографов по нижеприведённой формуле можно оценить величину смещения морского дна в месте генерации цунами:

$$A = A_0 \frac{1(\text{м})}{R^\alpha(\text{м})},$$

где A — величина смещения земной коры, зарегистрированная лазерным деформографом; A_0 — величина расчетного смещения в эпицентре землетрясения; R — расстояние от места генерации землетрясения до места размещения лазерного деформографа; α — коэффициент. Коэффициент α для рассмотренных землетрясений различен и меняется в пределах от 0,923 до 0,974 [8, 9].

Летом 2025 г. в Тихом океане вблизи берегов Камчатки 29 июля в 23:24:50 UTC в точке с координатами 52°30'36" с. ш. 160°15'40" в. д. произошло землетрясение магнитудой 8,8 по данным геофизической службы РАН. Согласно существующим нормативным документам геофизическая служба РАН передала информацию в МЧС России с последующим извещением о вероятности возникновения мощного цунами. По различным моделям, применяемым в разных мировых центрах, были оценены амплитуды цунами для акваторий Тихоокеанского региона, которые впоследствии оказались завышенными. Спустя почти сутки на сайте Американской геофизической службы появилась информация о величине смещения дна в месте генерации цунами.

Тремя лазерными деформографами, расположенными на морской экспериментальной базе (МЭС) ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», были зарегистрированы возмущения, вызванные данным землетрясением. На рис. 1 приведена схема расположения лазерных деформографов и других вспомогательных сооружений. Лазерные деформографы с длинами измерительных плеч по 52,5 м (1 и 2) расположены в подземных помещениях и ориентированы



Рис. 1. Схема расположения лазерных деформографов:

- 1 — 52,5-метровый лазерный деформограф СЮ-1,
- 2 — 52,5-метровый лазерный деформограф СЮ-2,
- 3 — 17,5-метровый лазерный деформограф

по азимуту 198° , а лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 17,5 м (3) находится в подземном помещении и ориентирован по азимуту 290° . Вся информация с лазерных деформографов поступает в лабораторное здание, где после предварительной обработки (фильтрация и децимация) заносится в базу экспериментальных данных.

На рис. 2 и 3 приведены участки записей лазерных деформографов СЮ-1 и СЮ-2, зарегистрировавших это землетрясение, на которых выделяется деформационная аномалия. Лазерный деформограф 3В тоже зарегистрировал сигнал землетрясения, на котором явно не прослеживается деформационная аномалия.

С учётом данных по коэффициенту α , полученных в работах [8, 9], и расстояния от эпицентра землетрясения до места размещения лазерных деформографов, были рассчитаны смещения морского дна в месте генерации цунами. Они находятся в диапазоне от 35 (СЮ-1) до 8 м (СЮ-2). По данным Американской геофизической службы смещение дна в месте генерации цунами было оценено в 10 м. Наблюдаемые расхождения связаны не только с неопределённостью коэффициента α для данного региона (северо-западная часть Тихого океана), но и с различным расположением устоев лазерных деформографов, на которых находятся оптические элементы интерферометров. Центральные интерференционные узлы лазерных деформографов находятся на одном и том же пирамидообразном гранитно-бетонном постаменте с усечённой верхушкой высотой около 3,5 м, нижним основанием 3×3 м и усечённой верхушкой $1,5 \times 2$ м, который расположен на су-глинке большой плотности (разрушенная скала с глиной). Уголковый отражатель лазерного интерферометра СЮ-1 находится на гранитно-бетонном основании высотой около 1 м, жёстко соединённом с гранитной скалой. Уголковый отражатель лазерного деформографа СЮ-2 расположен на гранитно-бетонном блоке, который расположен

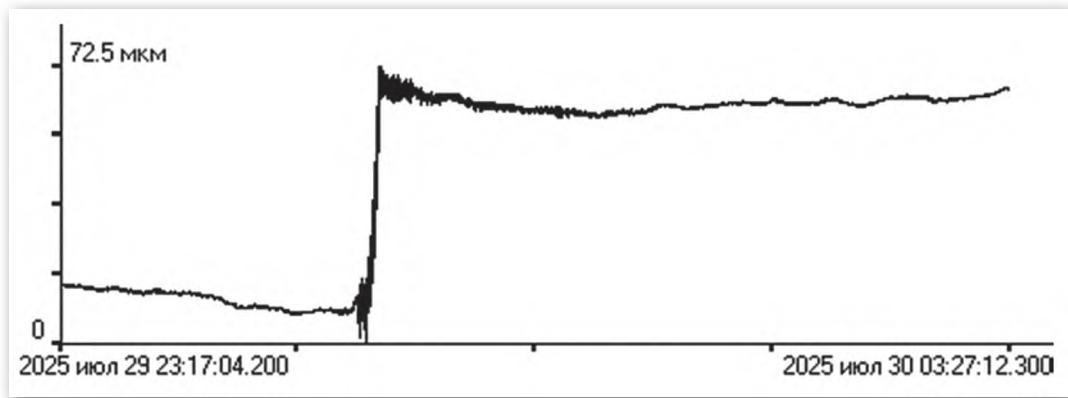


Рис. 2. Запись лазерного деформографа СЮ-1

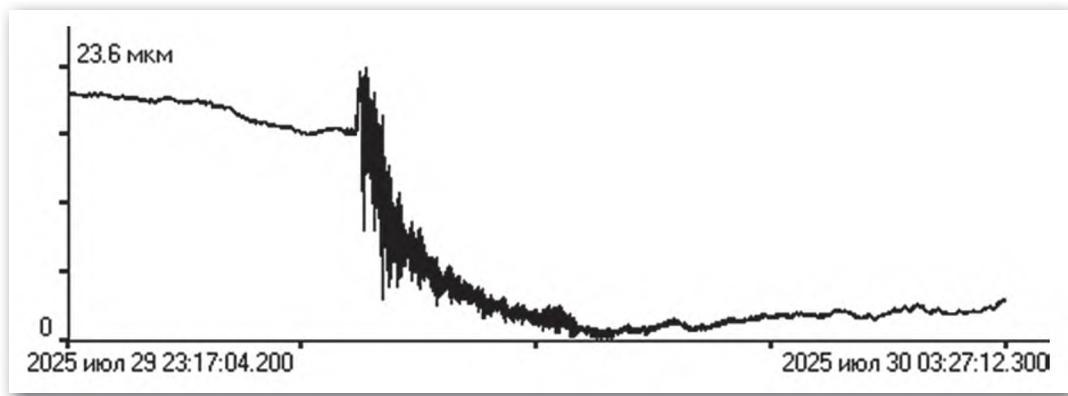


Рис. 3. Запись лазерного деформографа СЮ-2

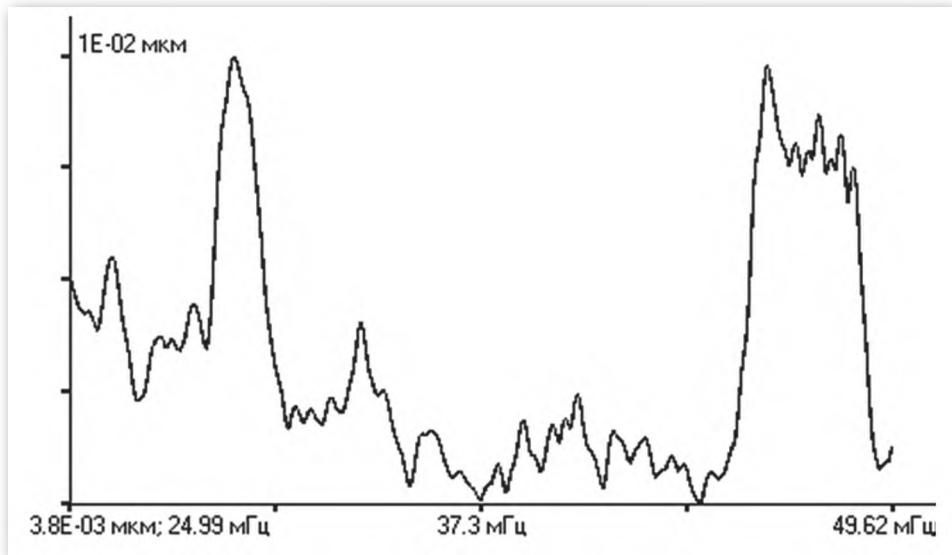


Рис. 4. Спектр, полученный при обработке участка записи лазерного деформографа СЮ-1, содержащего сигнал землетрясения

на песчаной подушке, установленной на суглинке. Расположение интерферометров приводит к тому, что распространяющееся возмущение отображается по-разному в лазерных деформографах СЮ-1 и СЮ-2 ввиду различия упругих характеристик (коэффициенты Ламе) сред, на которых расположены уголковые отражатели интерферометров. Как видно из рис. 2 и 3, аномальная деформация в лазерных деформографах СЮ-1 и СЮ-2, вызванная подвижками морского дна в эпицентре образования цунами, имеет не только различные величины, отличающиеся почти в три раза, но и знаки. При сравнении рис. 2 и 3 видно, что как только закончилась аномальная деформация в лазерном деформографе СЮ-1, так поведение с точностью до знака деформации в лазерном деформографе СЮ-1 становится аналогичным деформации в лазерном деформографе СЮ-2. Т.е. аномальный сигнал в лазерных деформографах отображается по-разному (с разным знаком), но при нормальной деформации сигнал отображается одинаково, но с различной величиной.

Участки записей лазерных деформографов содержат колебания, вызванные собственными колебаниями зоны разрыва в гипоцентре землетрясения, периоды которых примерно равны 33 и 22 с (см. рис. 4), хотя в отсутствии записи землетрясения данных колебаний в этом диапазоне периодов не наблюдается.

Использование лазерных деформографов в оперативном прогнозе цунами на сегодняшний день является наиболее перспективным направлением, по которому можно с большой точностью по аномальной деформации не только предсказать появление цунами, но и определить примерную величину смещения морского дна в месте генерации цунами. С учётом того, что скорость распространения деформационной аномалии на порядок больше скорости цунами, то можно значительно раньше объявить тревогу цунами и начать спасательные операции.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gusiakov V.K.* Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data // Pure Appl. Geophys. 2011. 16820332041.
2. *Titov V.V., Song Y.T., Tang L., Bernard E.N., Bar-Sever Y. & Wei Y.* Consistent estimates of tsunami energy show promise for improved early warning // Pure and Applied Geophysics. 2016. 173 (12). P. 3863–3880. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1312-1>.
3. *Gusman A. R., Tanioka Y., Sakai S., Tsushima H.* Source model of the great 2011 Tohoku earthquake estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data // Earth and Planetary Science Letters. 2012. 341–344. P. 234–242.
4. *Song Y.T., Han S. C.* Satellite observations defying the long-held tsunami genesis theory. In D. L. Tang (Ed.) // Remote sensing of the changing oceans. 2011. Berlin: Springer. P. 327–342. doi:10.1007/978-3-642-16541-2.
5. *Gusman A. R., Tanioka Y., Sakai S., Tsushima H.* Source model of the great 2011 Tohoku earthquake estimated from tsunami waveform and crustal deformation data // Earth and Planetary Science Letters. 2012. 341–344. P. 234–242.
6. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/> (Электронный ресурс).
7. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.* Регистрация деформационной аномалии цунамигенного землетрясения лазерным деформографом // Доклады Академии наук. 2007. Т. 412. № 1. С. 104–106.
8. *Dolgikh G. I., Dolgikh S. G., Kovalev S. N., Koren I. A., Ovcharenko V. V., Chupin V. A., Shvets V. A., Yakovenko S. V.* Recoding of Deformation Anomaly of a Tsunamigenous Earthquake Using a Laser Strainmeter // Doklady Earth Sciences. 2007. V. 412. № 1. P. 74–76.
9. *Dolgikh G., Dolgikh S.* Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origination // J. Mar. Sci. Eng. 2021. V. 9. P. 1144.
10. *Dolgikh G., Dolgikh S.* Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origins near the Japanese Islands // J. Mar. Sci. Eng. 2023. V. 11. P. 2137. <https://doi.org/10.3390/jmse11112137>.

НАКОПЛЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ФОРМИРОВАНИЕ БАЗ ДАННЫХ В РОССИЙСКИХ МИРОВЫХ ЦЕНТРАХ ДАННЫХ

Н. А. Сергеева¹, канд. физ.-мат. наук,
Л. П. Забаринская¹, Т. А. Крылова¹, Н. И. Книппер¹

¹Геофизический центр РАН, Москва, Россия

ACCUMULATION OF GEOPHYSICAL DATA AND CREATION OF DATABASES IN RUSSIAN WORLD DATA CENTERS

N. A. Sergeyeva¹, L. P. Zabarinetskaya¹,
T. A. Krylova¹, N. I. Knipper¹

¹Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

В работе представлен пример формирования в электронном виде массива сейсмологических данных о 167 тысячах землетрясений на территории бывшего СССР за период с 2000 г. до н. э. по 1991 г. и организации свободного доступа к этим данным на сайте Мировых центров данных.

The paper presents an example of the formation in electronic form of an array of seismological data on 167 thousand earthquakes in the territory of the former USSR for the period from –2000 BC to 1991 and the organization of free access to these data on the website of the World Data Centers.

Накопление и сохранение геофизических данных и обеспечение свободного и удобного доступа к ним является основной миссией российских Мировых центров данных (МЦД) по солнечно-земной физике и физике твердой Земли, входящих в Геофизический центр РАН. МЦД располагают обширными фондами данных в электронном виде, большая часть которых опубликована в сети Интернет на сайте Центров <http://www.wdcb.ru/index.ru.html>.

Наряду с данными в электронном виде в Мировых центрах данных за 70 лет со времени их создания были собраны большие массивы данных, представленных в традиционном бумажно-печатном виде. В ходе реализации проекта «Сохранение старых данных», выполняемого в Геофизическом центре, данные с бумажного носителя переводятся с помощью сканера в электронную форму (в цифровое изображение), и после необходимой обработки публикуются на сайте МЦД.

В МЦД по физике твердой Земли собрана коллекция каталогов в бумажно-печатном виде, содержащих информацию о землетрясениях на территории бывшего СССР за период с 2000 г. до н. э. по 1991 г. Коллекция включает «Каталог землетрясений Российской империи» [1], «Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 год» [2], «Атлас землетрясений в СССР» [3], «Бюллетень сети сейсмических станций СССР» [4] и ежегодники «Землетрясения в СССР» [5]. Все каталоги относятся к различным периодам времени.

Ниже описана работа, проведенная с каждым из этих каталогов для преобразования в электронную форму, а также способы размещения этих данных на сайте МЦД по физике твердой Земли.

«Каталог землетрясений Российской империи» [1] содержит текстовые описания для 2574 сейсмических событий, произошедших на территории Российской империи с 596 г. до н. э. по 1888 г. Каталог был преобразован в графический формат PDF (*Portable Document*

Format) и в виде одного файла опубликован на сайте http://www.wdcb.ru/sep/seismology/Earthquakes_of_the_Russian_Empire.pdf.

«Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года» [2] включает данные о 4612 эпицентрах землетрясений на территории СССР за временной период с 2000 г. до н. э. по 1974 г. Данные представлены в виде таблиц с определенным набором параметров в строке для каждого сейсмического события. Этот каталог также преобразован в формат PDF. На сайте МЦД он представлен в виде набора отдельных файлов, соответствующих частям оригинального каталога. Среди этих файлов — предисловие, описание организации каталога, описание сильнейших землетрясений и данные о землетрясениях в каждом из 16 сейсмоактивных регионов СССР. Переход к каждой части осуществляется по активной ссылке http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_strong_USSR_book.ru.html.

Одновременно каталог был преобразован в электронно-цифровой вид в текстовый формат TXT в кодах ASCII (American Standard Code for Information Interchange) [6]. Строки в файле каталога имеют одинаковую длину, и каждый параметр землетрясения (дата, время, координаты, глубина, энергетические характеристики) занимает определенные позиции в строке. В 1982 г. появилось американское издание каталога [7], дополненное данными по 1978 г. Файл каталога был продлен с учетом этого издания и сегодня он включает информацию о 4889 землетрясениях за период с 2000 г. до н. э. по 1978 г. Из файла легко выбрать данные о землетрясениях по любому из параметров и номеру региона. На сайте вместе с данными размещено подробное описание формата каталога http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_strong_USSR.ru.html.

«Атлас землетрясений в СССР» [3] включает каталоги землетрясений, полученные при обработке по единой методике инструментальных данных сети стационарных сейсмических станций СССР за период с 1911 по 1957 гг. для всей территории СССР и для девяти сейсмоактивных зон. Всего — 7314 событий. Каталоги являются параметрическими, т. е. включают стандартные значения параметров каждого землетрясения: момент возникновения, положение очага с оценкой точности его определения, интенсивность и магнитуду.

«Бюллетень сети сейсмических станций СССР» [4] (ежеквартальное издание) содержит инструментальные данные сети стационарных станций СССР, представленные в виде каталогов землетрясений для трех сейсмически активных зон, дополняющих по времени данные из «Атласа» в период с 1957 по 1961 гг. Каталоги содержат параметры 12230 сейсмических событий. Кроме того, в бюллетенях представлена подробная информация о 746 землетрясениях.

Сначала оба источника — «Атлас» и «Бюллетень» — были целиком преобразованы в электронную форму в графический формат PDF. Затем оператор перевел числовые данные, относящиеся к землетрясениям в каждой сейсмоактивной зоне, в табличный формат Microsoft Excel — XLSX. После этого программным путем массивы данных были преобразованы в текстовый формат TXT в ASCII кодах.

Раздел сайта, где размещен «Атлас землетрясений в СССР», содержит полный текст источника в формате PDF с приложением в виде цифровых изображений 16 карт. http://www.wdcb.ru/sep/seismology/Atlas/atlas_USSR.ru.html. Для восьми сейсмоактивных зон сформированы базы данных, опубликованные на сайте в свободном доступе. Каждая база данных содержит PDF-копии страниц «Атласа» с описанием особенностей сейсмоактивной зоны, наблюдений за сейсмической активностью и списком литературы; каталог землетрясений в электронной форме в трех форматах — PDF, XLSX и TXT с описанием формата; сведения о сейсмических станциях; карту-схему пространственного распределения эпицентров, построенную на основе каталога, и карту из Атласа с расположением очагов землетрясений.

Для публикации на сайте МЦД электронных версий каталогов трех сейсмоактивных зон из «Бюллетея сети сейсмических станций СССР» [4] также сформированы базы данных, содержащие каталоги землетрясений в форматах XLSX и TXT, сведения о сейсмических станциях и построенные карты-схемы пространственного расположения эпицентров. Пользователю предоставлена возможность обращения к PDF версии каждого ежеквартального выпуска бюллетея за период с 1957 по 1961 гг. В качестве примера приводится интернет-адрес базы данных Кавказской сейсмоактивной зоны: http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_USSR_net/CAU/cat_b_CAU.ru.html.

Ежегодники «Землетрясения в СССР», охватывающие 30-летний период с 1962 по 1991 гг., переведены в графический формат PDF и после завершения процесса редактирования будут размещены на сайте МЦД. Содержащиеся в этих изданиях каталоги землетрясений, произошедших в 14 сейсмических регионах СССР, переведены в цифровой вид в текстовый формат в кодах ASCII. В региональных каталогах содержатся параметры гипоцентров 139983 землетрясений: дата, время, географические координаты, глубина, значения энергетического класса и магнитуды. Данные о сейсмических событиях расположены в каталогах в хронологическом порядке. На сайте представлена таблица с информацией для каждого региона: название, номер и код региона, число событий и размер файла каталога в мегабайтах http://www.wdcb.ru/sep/seismology/cat_USSR.ru.html. По ссылкам обеспечен переход к каждому каталогу и к описанию формата и особенностей каталога, которые надо учитывать при работе с ним. Описания составлены на основе статей из ежегодников.

Таким образом на сайте МЦД представлены в свободном доступе в электронном виде в нескольких форматах данные о 167 тысячах землетрясений на территории бывшего СССР с 2000 г. до н. э. по 1991 г.

Продолжением этого массива данных являются каталоги с 1992 г. по настоящее время, публикуемые ежегодно в изданиях «Землетрясения Северной Евразии» и «Землетрясения России» Единой геофизической службой РАН (ФИЦ ЕГС РАН) и представленные в свободном доступе в электронном виде на сайтах <http://www.ceme.gsras.ru/zse/> и <http://www.ceme.gsras.ru/zr/>.

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России. В работе использовалось оборудование и данные, предоставленные Центром коллективного пользования «Аналитический центр геомагнитных данных» Геофизического центра РАН (ckp.gcras.ru).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мушкетов И. В., Орлов А. П.* Каталог землетрясений Российской империи. Записки Императорского Русского Географического Общества, по общей географии. Том XXVI, Санктпетербургъ, 1893, 582 с.
2. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н. В. Кондорской, Н. В. Шебалина. М.: Наука, 1977. 536 с.
3. Атлас землетрясений в СССР. Результаты наблюдений сети сейсмических станций СССР, 1911–1957 гг. / Под ред. Е. Ф. Саваренского, С. Л. Соловьева, Д. А. Харина. М.: АН СССР, 1962.
4. Бюллетень сети сейсмических станций СССР (ежеквартальные выпуски 1957–1961 гг.) / Под ред. Е. Ф. Саваренского. М.: Наука, 1958–1964.
5. Землетрясения в СССР... (ежегодники 1962–1991 гг.). М.: Наука, 1964–1997.
6. *Charles E. Mackenzie.* Coded Character Sets, History and Development. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1980. 513 p.
7. New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from ancient times through 1977. Eds. N. V. Kondorskaya, N. V. Shebalin. World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Report SE-31, NOAA, Boulder, Colorado, USA, 1982, 608 p.

**СОЗДАНИЕ И ПОДДЕРЖКА
УЗКОСПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ БАЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ
ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ**

*Е. В. Гилева¹, С. А. Епифанов¹,
И. Е. Савело¹, Н. А. Санников¹*

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, Россия

**DEVELOPMENT AND MAINTENANCE
OF SPECIALIZED DATABASES FOR NATURAL PHENOMENA
OBSERVATIONS IN THE WORLD OCEAN**

*E. V. Gileva¹, S. A. Epifanov¹,
I. E. Savelo¹, N. A. Sannikov¹*

¹Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia

В статье представлен опыт создания и поддержки трех узкоспециализированных баз данных наблюдений природных явлений в Мировом океане. Рассмотрены их структура, объем и текущее содержание. Для взаимодействия с каждым из каталогов разработан веб-интерфейс, позволяющий осуществлять просмотр, поиск, редактирование, удаление записей. Для визуализации географического распределения наблюдений использованы Яндекс.Карты.

The article presents the experience of development and maintaining three highly specialized databases of observations of natural phenomena in the World Ocean. Their structure, volume and current content are considered. To interact with each of the catalogs, a web interface has been developed. It allows users to view, search, edit, and delete records. Yandex.Maps were used to visualize the geographical distribution of observations.

В статье обсуждается опыт создания и поддержки трех узкоспециализированных каталогов зарегистрированных природных явлений в Мировом океане. Первым из них является база данных наблюдений внутренних гравитационных волн, содержащая 3876 записей из 1074 литературных источников. Эти волны способны оказывать негативное влияние на морские экосистемы и хозяйственную деятельность человека на шельфе. Так, например, сдвиговые потоки, возникающие при распространении внутренних волн, могут способствовать сильному перемешиванию и генерации областей турбулентности, воздействуя на основания платформ и размывая донные отложения под проложенными трубопроводами. Второй — каталог явлений, связанных с вертикальной циркуляцией прибрежных вод в морских акваториях, — включает в себя данные о 251 случае апвеллингов, даунвеллингов и каскадингов из 199 опубликованных научных работ. Апвеллинг/даунвеллинг может привести к образованию пленочных загрязнений, став причиной плавления находящихся на дне тяжелых нефтеуглеводородов и их всплытия [1], вызвать несбалансированную эвтрофикацию вод. База данных наблюдений и моделирования длинных захваченных волн в окраинных морях хранит информацию о 80 зарегистрированных проявлениях краевых, шельфовых волн, волн Пуанкаре и волн Кельвина из 60 литературных источников.

Схемы баз данных. Разработка трех баз данных велась на основе системы управления базой данных MySQL; структура изображена на рис. 1–3. Описание полей более подробно представлено в работах [2–4].

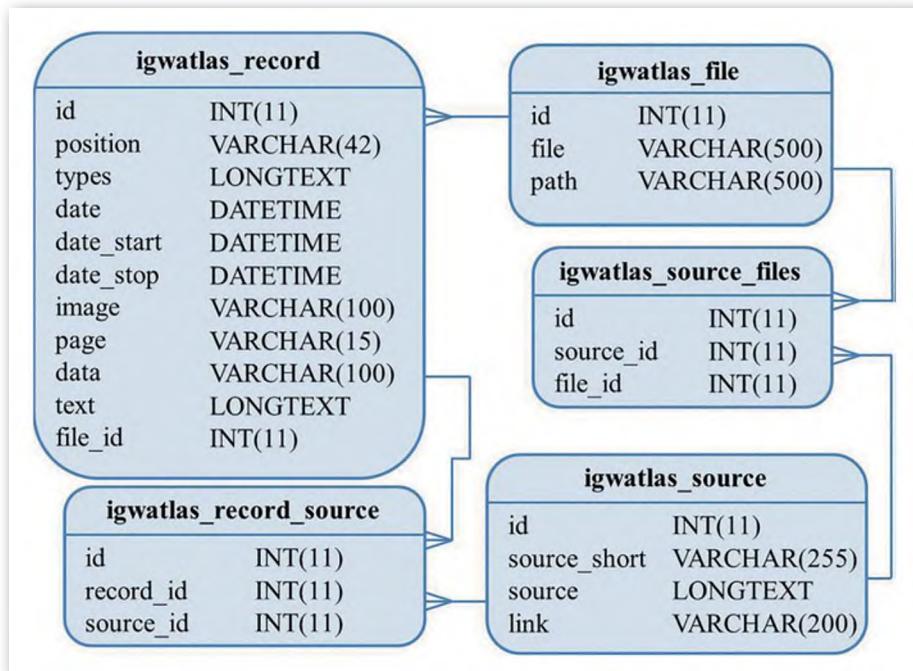


Рис. 1. Схема базы данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане [2]

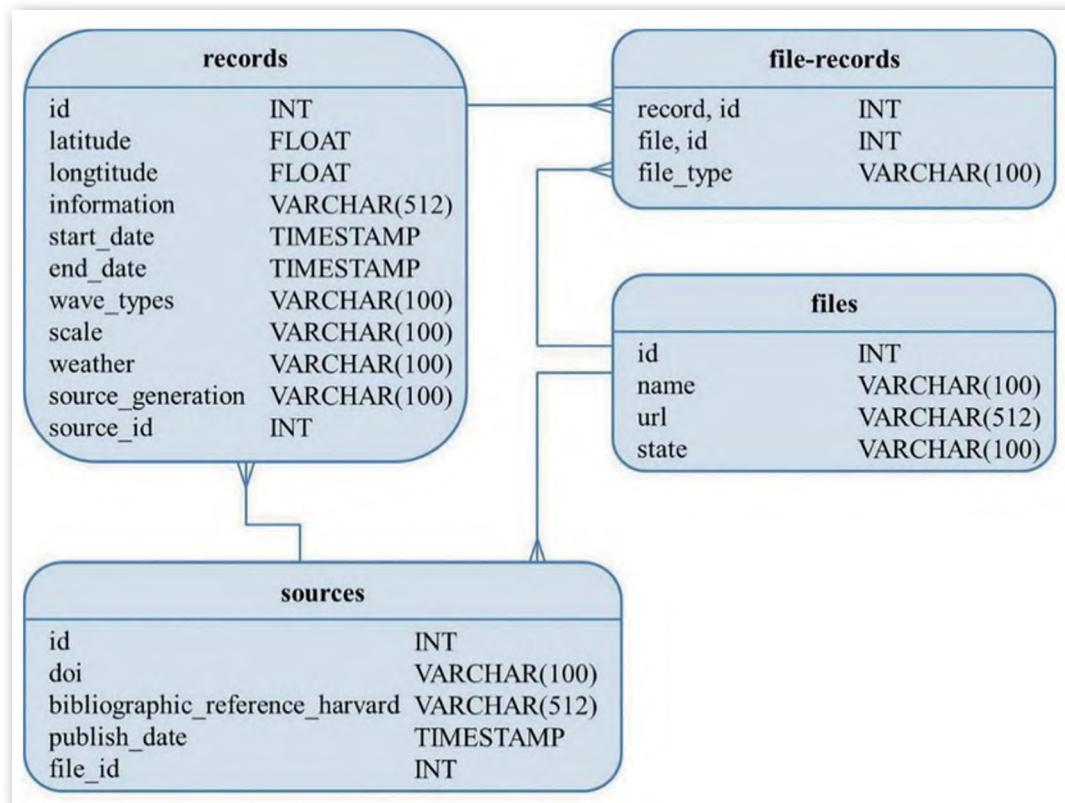


Рис. 2. Схема базы данных наблюдений захваченных волн [3]

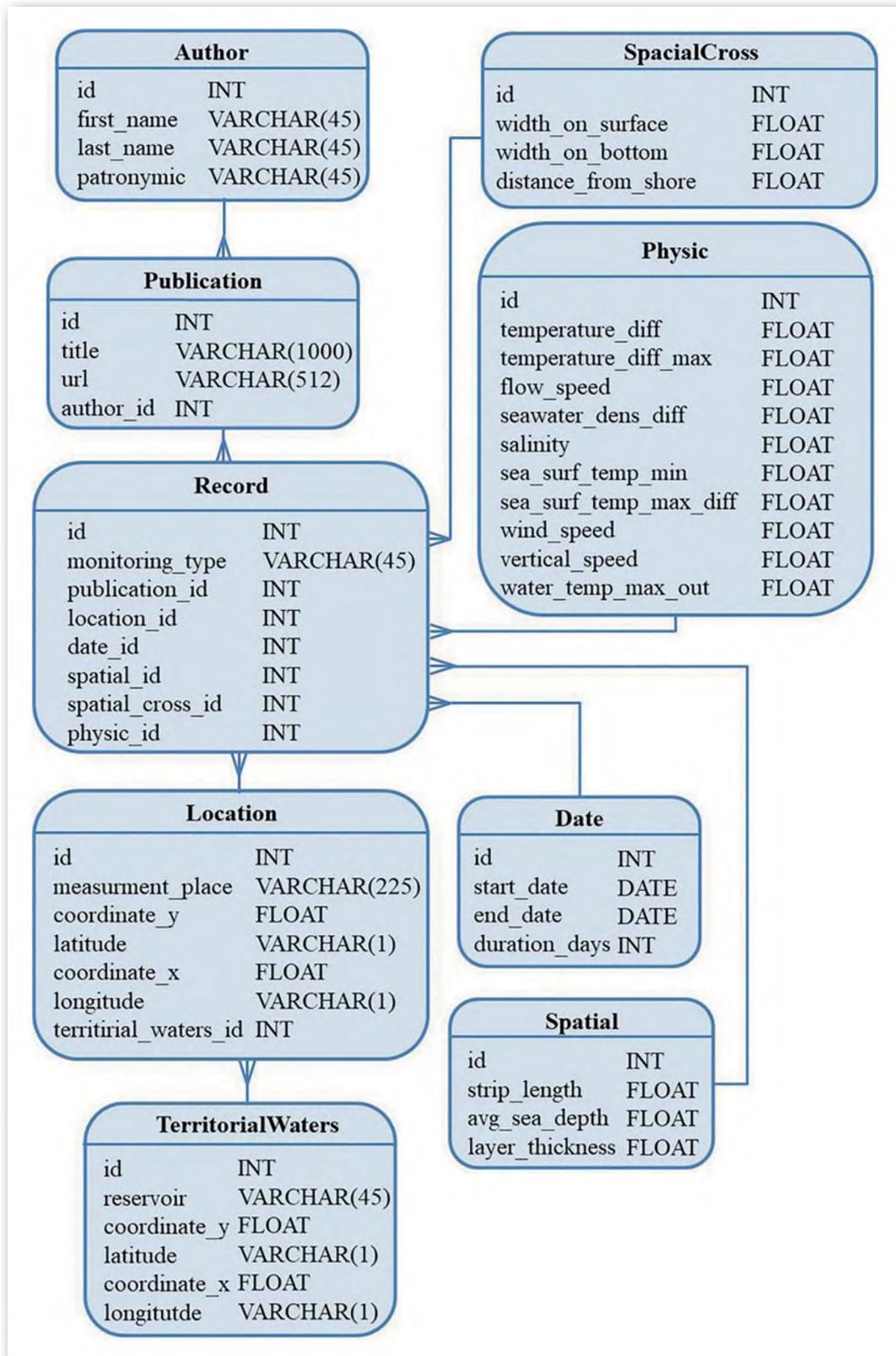


Рис. 3. Схема базы данных явлений, связанных с вертикальной циркуляцией прибрежных вод в морских акваториях [4]

Пользовательский интерфейс. Для работы с каждой из баз данных на основе фреймворков Django и NestJS разработан веб-интерфейс, позволяющий осуществлять просмотр, поиск, редактирование, удаление записей. Для визуализации географического распределения наблюдений использованы Яндекс.Карты [3]. Отображение данных в виде интерактивной карты упрощает поиск необходимых записей. Работа с наблюдениями реализована через панель администратора.

На рис. 4 представлен пример оформления интерактивных карт.

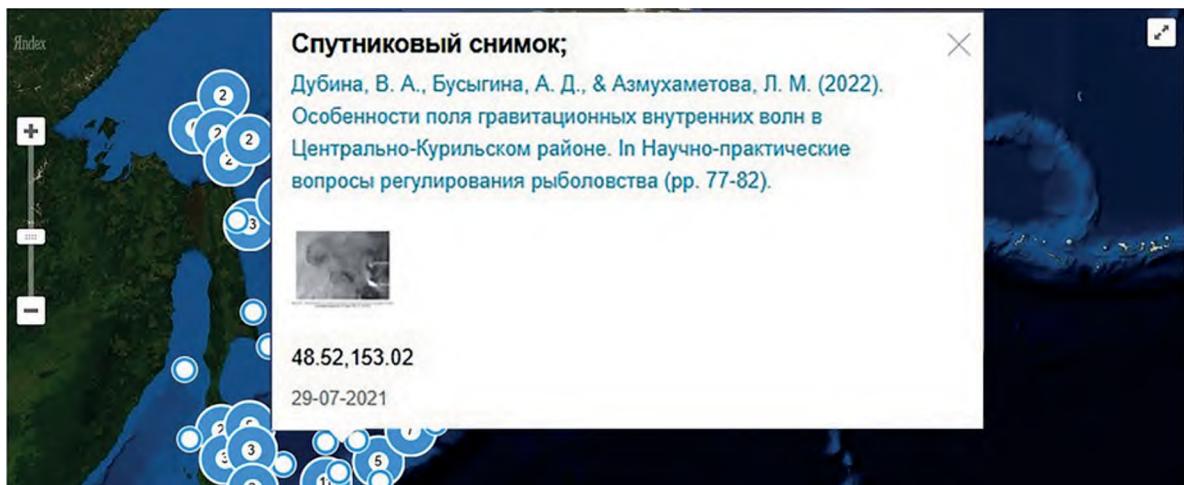


Рис. 4. Веб-страница с визуализацией наблюдения из литературного источника

Опыт создания и поддержки. Сбор и обработка данных осуществлялись в несколько этапов. Первоначально выполнялся поиск и систематизация литературных источников, содержащих сведения об эпизодах проявления внутренних волн, апвеллингов и других явлений. Основной объём информации был извлечён из открытых источников — научных статей, сборников конференций, монографий. При этом возникали трудности, связанные с разнообразием форматов представления данных: одни авторы приводили лишь текстовое описание явлений, другие — таблицы с параметрами, третья — графики или карты без точных координат.

Дополнительные сложности заключались в различиях систем координат, единиц измерения и терминологии. Для унификации исходных данных была разработана система правил нормализации, включающая конвертацию координат, пересчёт величин в стандартные единицы и использование контролируемого словаря терминов. Каждая запись проходила валидацию; в ряде случаев требовалась дополнительная интерпретация или уточнение сведений по смежным источникам, так как информация могла быть неполной или противоречивой.

Поддержка веб-сайта включала обновление окружения, мониторинг и доработку интерфейса (фильтры, новые способы визуализации). Использование фреймворков Django и NestJS позволило развивать приложение без серьёзных затрат на архитектуру.

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023–0004 «Нелинейная волновая динамика прибрежной зоны в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Станичный С. В., Александрова А. А., Латушкин А. А., Лишаев П. Н., Кубряков А. А., Кучейко А. Ю., Медведева А. В., Чепыженко А. И. Даунвеллинг как источник поверхностных плёночных загрязнений

- ний // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М., 2019. С. 338.
2. *Епифанова А. С., Рыбин А. В., Моисеенко Т. Е., Куркина О. Е., Куркин А. А., Тюгин Д. Ю.* База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 4. С. 395–403.
 3. *Савело И. Е. Епифанов С. А., Епифанова А. С.* Веб-приложение для взаимодействия с базой данных наблюдений захваченных волн в Мировом океане // Сборник материалов 34-й Всероссийской молодежной научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам. Нижний Новгород, 2024. С. 129–134.
 4. *Санников Н. А., Епифанова А. С., Рыбин А. В., Епифанов С. А.* Приложение для удаленного взаимодействия с базой данных наблюдений апвеллингов // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 14–24.

РАЗДЕЛ 2

КАТАЛОГИЗАЦИЯ, АНАЛИЗ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ПРОЛИВАХ МИРОВОГО ОКЕАНА. ФРАГМЕНТЫ МОРСКОЙ ИСТОРИОГРАФИИ

А. А. Родионов¹, чл.-корр. РАН,

Н. Е. Вольцингер¹, В. А. Рябченко¹, докт. физ.-мат. наук

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

HYDRODYNAMIC RECONSTRUCTION OF HISTORICAL EVENTS IN THE STRAITS OF THE WORLD OCEAN. FRAGMENTS OF MARINE HISTORIOGRAPHY

А. А. Rodionov¹, Corr. Memb. RAS,

N. E. Voltzinger¹, V. A. Ryabchenko¹, Doct. Phys. and Math. Sc.

¹Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

В статье представлен подход к реконструкции исторических событий на основе гидродинамического моделирования. Методология реконструкции событий включает построение базы данных, постановку и численную реализацию краевой задачи и оценку адекватности модели на примере трех исторических событий.

The article presents an approach to reconstructing historical events based on hydrodynamic modeling. The methodology for reconstructing events includes building a database, formulating and numerically implementing a boundary value problem, and assessing the adequacy of the model using three historical events as an example.

Море постоянно только в своей изменчивости. Иногда оно предстает ареной событий, оставивших глубокий след в исторической памяти народов. О трех таких эпизодах на ленте морской историографии, уходящих в далекое прошлое, и повествуется в работе. Оказывается, что гидродинамическое моделирование может внести ясность в описание событий, которые происходили в далекие времена. Вместе с тем в современных условиях мы располагаем недостаточной информацией для полноты реконструкции, и критерием репрезентативности моделирования является соответствие результатов совокупности основных характеристик событий, которые доходят до нас лишь умозрительно.

В статье приводятся результаты моделирования трех исторических событий: переход израильтян через Красное море при Исходе из Египта, проход Одиссея между Сциллой и Харибдой в Мессинском проливе, штурм на Геллеспонте в 480 г. до н. э. при походе Ксеркса в Грецию.

Переход израильтян через Красное море при Исходе из Египта

Исход израильтян из Египта в XIII в. до н. э. сыграл ключевую роль в формировании у народов многих стран ветхозаветного религиозного сознания. Центральным моментом этого события явился Переход через Красное море. В библейском описании Переход предстает как сотворенное Господом чудо. Сама же по себе картина события, представленная в Книге Исход, когда под действием ветра вода «расступается», обнажая дно, а затем возвращается «в свое место», совершенно правдоподобна, что дало основание древнему историку после библейского описания добавить: «Это могло совершиться по воле Божьей, а также и естественным путем. Пусть каждый думает, как ему кажется лучше» [1].

Восходящую к Флавию возможность рационального толкования Перехода разделяли и многие теологи. Такую интерпретацию Перехода можно рассматривать как следование Правилу Ньютона: «Не должно принимать в природе иных причин, сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явлений» [2].

В согласии с этим последуем за израильтянами из Раамсеса в нижнем Египте до Ефама на границе пустыни, где был их второй стан (Числа, 33.6). Здесь они развернулись и прошли на юго-запад. Библейское объяснение изменения маршрута при преследовании египтянами представлено как предусмотрительный маневр: «И скажет фараон: “Они заблудились в земле сей, заперла их пустыня”» (Исход, 14.3). Однако, отойдя на юго-запад, израильтяне оказались в ловушке. С севера надвигались египетские колесницы, пути к западу и к югу преграждал горный хребет Джабель-Атака (рис. 1).

Далее события развивались так: «...гнал Господь море сильным восточным ветром всю ночь и сделал море сушью» (Исход, 14.21), что позволило израильтянам перейти через Красное море. Во время «утренней стражи» подходит крутая волна и останавливает преследование. По нашему мнению, это произошло в Суэцком заливе Красного моря, где на глубине ~4 м пролегает риф. Существуют и иные точки зрения. Так, Карл Дрюс и Вэйцин Хань (США) провели моделирование для озера Манзала (расположено в дельте Нила) и показали, что ураганный ветер (скорость около 100 км/ч) может разделить озеро на две части с шириной прохода до 5 км [3]. Дорон Ноф (США) исследовал возможность перехода израильтян в районе современного пляжа на севере Красного моря [4]. Так же как и в первом случае ураганный ветер мог разделить воды на две части и обнажить дно. Однако в обоих случаях переход огромной массы людей со скотом и домашней утварью по илистому дну при ураганном ветре практически невозможен.

Моделирование обмеления рифовой зоны в Суэцком канале под действием солнного штормового ветра и отлива при сравнении с библейским описанием составляет содержание работы [5].

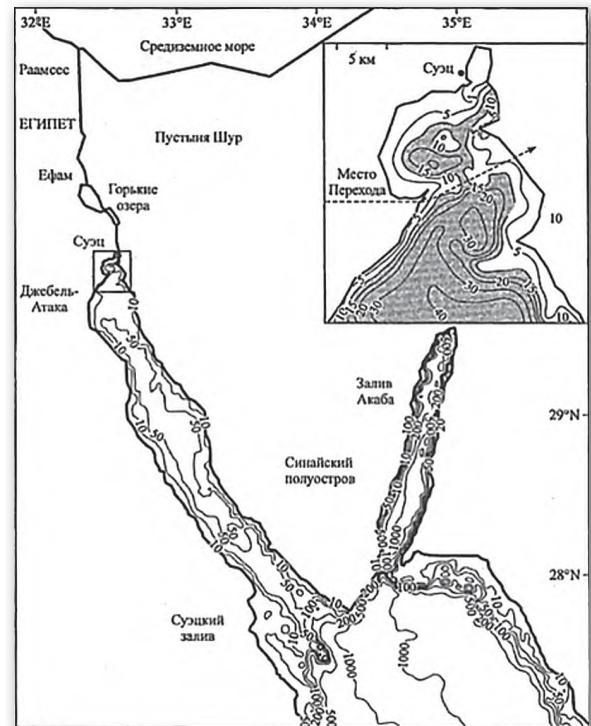


Рис. 1. Карта Суэцкого канала и прилегающей территории

Краевая задача для 3-Д системы уравнений движения, неразрывности, уравнений среднего по вертикали движения, турбулентного замыкания и процедуры обмеления дна преобразуется к криволинейным гранично-согласованным координатам, отображающим физическую область задачи на вычислительный параллелепипед [6].

Задача решается на равномерной прямоугольной сетке в параллелепипеде Q , являющейся отображением криволинейной сетки, построенной в физической области. Решение использует расщепление краевой задачи по координатным направлениям. Аппроксимация адвекции допускает использование схем первого, второго либо третьего порядка точности. Уровень определяется решением эллиптической задачи. Реализация разностной краевой задачи использует телескопизацию рифовой зоны при повышении разрешимости сетки на порядок: на сетке 65×123 узлов по горизонтали $\Delta_{\min} = 40$ м и 50 слоев по вертикали с $\Delta = 8$ см и шагом по времени $\tau = 58,2$ с.

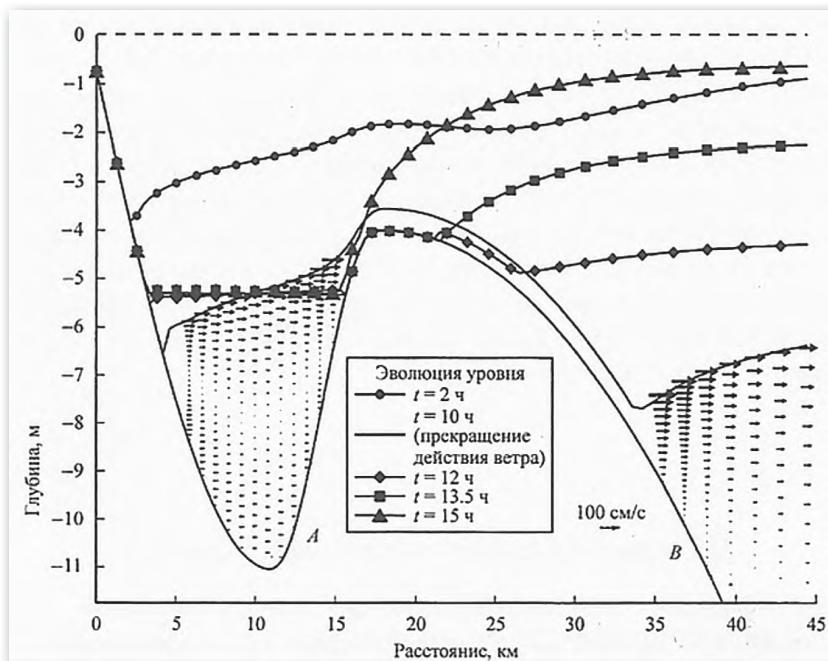


Рис. 2. Обмеление и затопление модельного рифа под действием прилива и ветра:

глубина места под рифом = 4 м, скорость ветра = 36 м/с,
кривыми обозначены уровни для заданного времени

Возможность перехода полностью определяется сложившейся ситуацией на Суэцком рифе. Начало действия ветра совпадает с моментом низкой воды на отметке 1 м относительно невозмущенного состояния. На рис. 2 показана зависимость обмеления рифа от времени действия ветра. После 10 ч действия ветра со скоростью 36 м/с зона обмеления достигает ширины 17,5 км. В течение последующих 3,5 ч эта зона сокращается, однако на вершине в зоне 5 км глубина остается менее 15 см. Расчеты показали, что при прекращении действия ветра рифовая отмель шириной 2–3 км остается обнаженной около 4 ч, что позволяет перейти на восточный берег большой массе людей и скота. Затем риф быстро накрывается пришедшей возвратной волной, останавливающей преследование*.

Такой характер решения полностью соответствует ситуации, описанной в книге Исход.

* Расчет обмеления и затопления рифа выполнил Д.А. Романенков.

Проход Одиссея между Сциллой и Харибдой в Мессинском проливе

Содержанием задачи является моделирование эпизода из «Одиссеи» Гомера (VIII в. до н. э.) — проход корабля между Сциллой и Харибдой [7]. Оказывается, что «задача Одиссея» предлагает наилучшую тактику прохода между двумя мессинскими вихрями — тактику, которая не одно тысячелетие оставалась правилом для древних кормчих. Одиссей образно поведал о ней, но в его описании предстает весь ужас первых мореходов перед грозной стихией: «Страшное тут я узрел, и страшней ничего мне зреть никогда в продолжении странствий моих не случалось» (Одиссея, XII, 258). А ведь Одиссей к тому времени побывал и в пещере Полифема, и в Аиде. Ему было с чем сравнивать...

Порожденные творческой фантазией приключения Одиссея обладают убедительностью и представляются вполне реалистичными.

Мессинский пролив замечателен своей интенсивной приливной динамикой. В его узкости между Сциллой и Капо Пелоро (Харибда) средняя по глубине скорость достигает 2,5 м/с при расстоянии между этими вихрями около 0,3 км. Это — сегодня, когда горловина пролива расширена частыми землетрясениями. В древности, согласно эпосу, они отстояли «на выстрел из лука» (Одиссея, XII, 102). Легко представить, что там было гиблое место...

Моделирование ситуации в проливе во времена, восходящие к микенскому периоду греческой цивилизации, мы осуществим небольшим сдвигом границ узкости и локальным поднятием дна [8, 9]. Оказывается, что при такой реконструкции пролива средняя скорость возрастает до 4 м/с, а интенсивность вихрей увеличивается на порядок. При этом, при течении южного направления путь входа в пролив, рекомендованный Цирцеей, этой «богиней богинь» как наименее опасный, приводит к водовороту Сциллы. Можно также видеть, что при течении северного направления Одиссей, увлекаемый приливным потоком, должен быть вынесен на Харибду.

Область пролива в криволинейных гранично-согласованных координатах отображается на вычислительный прямоугольник. Краевая задача для средних по вертикали уравнений преобразуется к форме контравариантных компонентов вектора скорости. Уравнения аппроксимируются разностной схемой второго порядка точности и реализуются расщеплением по координатным направлениям на сетке 16×27 узлов с шагами $\Delta_{\min} = 50$ м, $\Delta_{\max} = 1000$ м и $\tau = 240$ с.

Расчет выявил локализацию циклонических водоворотов в проливе: вихрь у мыса Капо Пелоро (Харибда) и вихревую систему «Сцилла — Пунта Пеццо», генерируемых суммой гармоник M2, S2, K1, O1. На модельных расчетах выяснена роль физических и морфометрических факторов, определяющих чрезвычайно интенсивную динамику пролива (рис. 3).

В реконструированных условиях течения резко интенсифицируются, а гидродинамическая ситуация отвечает описанию пути корабля Одиссея при входе в пролив с севера и подтверждает траекторию выноса Одиссея на Харибду с юга...

Таким образом реконструированная ситуация отвечает эпизоду эпоса.

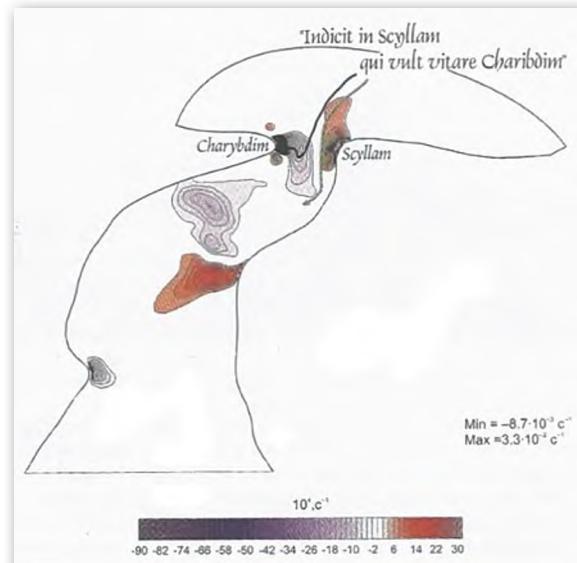


Рис. 3. Поле завихренности на момент максимальных течений южного направления Стрелками указаны две траектории возможного движения кораблей

Шторм на Геллеспонте в 480 г. до н. э. при походе Ксеркса в Грецию

Во время греко-персидских войн (550–449 гг. до н. э.) бог моря Посейдон несколько раз вмешивался в ход войны на стороне греков [10]. Так было и в начале похода персидского царя Ксеркса, когда тот пытался переправить свою огромную армию через Геллеспонт (Дарданеллы) из Малой Азии. Посейдон вызвал в проливе шторм такой силы, что гул его дошел до наших времен.

Шторм разрушил мост, сооруженный в узкости пролива у Абидоса. «Ксеркс распалился страшным гневом и повелел бичевать Геллеспонт (Геродот, VII, 35). Когда силы природы персонифицированы, бичеванием моря наказывается сам Посейдон...

Дарданеллы соединяют Мраморное море с Эгейским (рис. 4). Длина пролива — 120 км, ширина — 1,3–8,5 км, глубина — 5,3–106 м.

Моделирование шторма осуществлялось по методологии [6]. При реконструкции нельзя не учитывать влияния частых в этом регионе землетрясений. Веками деформировавших структуру пролива. Его реконструкция сводится к небольшому уменьшению ширины и глубины до 80 м в зоне Абидоса. Расчеты на криволинейной сетке 32×26 выполнены для ветра северного направления при градациях 20, 25, 30 и 32 м/с. Расчеты зависимости скорости течений от силы ветра при различном характере реконструкции пролива показали, что в современных условиях при шторме с установившимся ветром 30 м/с средняя по глубине скорость течения у Абидоса достигает 5 м/с, а в реконструированном проливе достигает 8 м/с; при ветре 32 м/с скорость течения превосходит 9 м/с. Легко представить, как реагировала гибкая понтонная конструкция моста, составленного из заякоренных триер и пентеконтер поперек пролива, как лопались связывающие их канаты из льна и папируса...

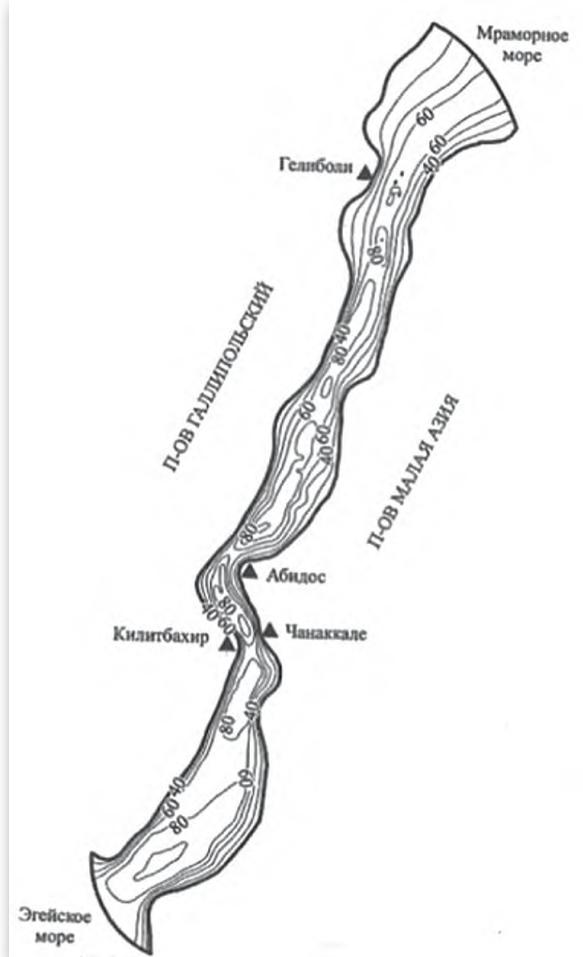


Рис. 4. Батиметрия пролива Дарданеллы

Неудача не остановила Ксеркса. Он соорудил новый мост, поражающий своей грандиозностью (Геродот, VII, 36) [10] и переправил армию в Европу. Оскорбленный Посейдон изменил тактику и полностью отомстил Ксерксу в том же году в другом проливе — между Аттикой и Саламином.

Таким образом реконструкция событий, в том числе опасных, на основе физико-математического моделирования позволяет установить объективность причины, выявить особенности протекания природных и социальных процессов и сформулировать рекомендации по предотвращению катастроф в будущем.

Статья подготовлена в рамках госзадания FMWE-2024-0028.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Флавий И.* Иудейские древности. М.: Ладомир, 1994. Т. 2. 716 с.
2. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии. Кн. III. М.: Наука, 1989.
3. https://www.epochtimes.ru/content/view/42460/5/?ysclid=mf3msq0zwj196704478&utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F [Электронный ресурс], дата обращения: 03.09.2025 г.
4. <https://lenta.ru/news/2025/09/03/stalo-izvestno-o-zhelanii-trampa-vvesti-novye-sanktsii-protiv-rossii/> [Электронный ресурс], дата обращения: 03.09.2025 г.
5. *Вольцингер Н. Е., Андросов А. А.* Моделирование гидродинамической ситуации Исхода // Известия РАН. ФАО, 2003. Т. 39, № 4. С. 532–546.
6. *Вольцингер Н. Е., Клеванный К. А., Пелиновский Е. Н.* Длинноволновая динамика прибрежной зоны. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 272 с.
7. *Гомер. Одиссея* / перевод В. Жуковского. М.: Дюна, 1993.
8. *Андросов А. А., Вольцингер Н. Е., Каган Б. А., Салусти Е.* Мессинские вихри в настоящем и прошлом // Известия РАН. ФАО, 1995. Т. 31, № 5. С. 679–691.
9. *Вольцингер Н. Е., Андросов А. А.* Моделирование длинноволновой негидростатической динамики на горном рельефе. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 169 с.
10. *Геродот.* История. Л.: Наука, 1972. 599 с.

БАСНОСЛОВНОЕ НАВОДНЕНИЕ НЕВЫ 1691 г.

А. А. Родионов¹, чл.-корр. РАН,

А. А. Лобанов¹, докт. техн. наук,

Т. И. Малова¹, канд. геогр. наук, Н. Г. Зеленкова¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

THE FABULOUS NEVA FLOOD, 1691

A. A. Rodionov¹, Corr. Memb. RAS,

A. A. Lobanov¹, Doct. Techn. Sc.,

T. I. Malova¹, Ph.D., N. G. Zelenkova¹

¹Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

В литературе часто встречаются ссылки на различные источники, свидетельствующие о грандиозных наводнениях Невы, происходивших еще до строительства Санкт-Петербурга. Одним из ключевых событий, предположительно случившихся до момента основания города, является наводнение Невы 1691 г. На него ссылаются более 250 лет, при том, что первичное сообщение об этом событии со временем обрастило дополнительными деталями и эмоциональными подробностями. Среди авторов, писавших о наводнении 1691 г.: И. Г. Георги (1794 г.), В. Н. Берх (1826 г.), П. П. Карапыгин (1889 г.), М. А. Рыкачев (1898 г.), Б. П. Мультановский (1925 г.), Р. А. Нежиховский (1988 г.) и др. Впервые же о нем в 1739 г. сообщил Ф. Х. Вебер.

The literature often contains references to various sources that testify to the grandiose Neva floods that occurred even before the construction of St. Petersburg. One of the key events that supposedly happened before the founding of the city is the Neva flood, 1691. It has been referred to for more than 250 years, despite the fact that the initial message about this event over time acquired additional details and emotional particulars. Among the authors who wrote about the flood, 1691: I. G. Georgi (1794), V. N. Berkh (1826), P. P. Karatygin (1889), M. A. Rykachev (1898), B. P. Multanovsky (1925), R. A. Nezhikhovsky (1988) and others. The first to report about it (1739) was F. H. Weber.

В литературе часто встречаются ссылки на различные источники, неопределенно свидетельствующие о грандиозных наводнениях Невы, происходивших еще до строительства Санкт-Петербурга. Фактический перечень допетровских наводнений не подкреплен, как правило, источниками, на которые ссылаются авторы. В этом отношении приоритет — за явлениями, геофизически увязанными с наводнениями.

Из обширных материалов, посвященных допетровским, зачастую легендарным, наводнениям остановимся на событии, относимом к 1691 г. Сам факт этого наводнения неочевиден, а высота, ему приписываемая, в XIX–XXI вв. была представлена в различных системах отсчета: в 1878 г. — в футовой мере от ординара Главной физической обсерватории (ГФО), в 1946 г. — в метрической системе отсчета в Балтийской системе высот (БС) [1–9 и др.]. Эти данные вошли, таким образом, в официальные каталоги и внесли глобальную путаницу в вековой уровнемерный ряд наводнений Невы. В табл. 1 представлено число наводнений Невы, отраженных в перечнях 1898–2013 гг.

Таблица 1

Число наводнений Невы: 1691 и 1703–1726 гг., отраженных в перечнях 1898–2013 гг.

	Авторы, годы опубликования перечней	1691 г.	1703–1726 гг.
1	Рыкачев М.А., 1898 г.	1	10

	Авторы, годы опубликования перечней	1691 г.	1703–1726 гг.
2	<i>Святский Д.О.</i> , 1933 г.	—	31
3	<i>Грушевский М.С., Лазаренко Н.Н.</i> , 1957 г.	1	11
4	<i>Нежиховский Р.А.</i> , 1988 г.	1	11
5	<i>Померанец К.С.</i> , 1998 г.	—	12
6	<i>Померанец К.С.</i> , 2004, 2005, 2009 гг.	—	14
7	<i>Беспятых Ю.Н.</i> , 2013 г.	—	≥54

Впервые о наводнении Невы 1691 г. (в публикации 1739 г.) сообщил ганноверский резидент при русском дворе Ф. Х. Вебер, описывая событие 1721 г. (перевод текста — д.ист.н. Ю. Н. Беспятых): «Трое старых крестьян, которые жили рыболовством и проживали здесь еще до построения города Петербурга, рассказывали, что тридцать лет тому назад еще более сильное наводнение затопило всю местность до города Ниеншанца, и подобные несчастья происходили почти каждые пять лет. Поэтому все прежние жители этой местности никогда не хотели возводить добрые здания на реке Неве в том месте, где теперь расположен Петербург, а сооружали лишь несколько плохих рыбакских домов, которые они, как только определяли по опыту приближение шторма, спешно сносили, связывали вместе балки и доски наподобие плотов и привязывали к деревьям, а сами отправлялись в безопасное место, в Дудергоф, в шести милях от Петербурга. После окончания шторма они снова находили свои балки и вновь сооружали рыбакские хижины. Я привожу эти обстоятельства намеренно, чтобы с их помощью показать, что российский император построил свою новую резиденцию почти вопреки природе, и за счет таких огромных усилий искусно преодолел множество препятствий. При нынешнем несчастье все его внимание было направлено на то, как можно управиться с этим злом. Поэтому он принимал много всевозможных мер и знал, что за счет полного укрепления петербургского берега он не только упреждал гибель города, но также мог представить взорам света самое великое среди всех своих чудесных творений» [7]. Этот же фрагмент привел в своей публикации 1780 г. и академик В. Л. Крафт. Именно ему принадлежит расчет даты наводнения исходя из приведенных Ф. Х. Вебером воспоминаний рыбаков: 1721–30=1691. В данном тексте важно упоминание того, что предшествовавшие наводнения достигали уровня р. Охты примерно раз в пять лет. Однако низменность и заболоченность территории, неопределенность ординара и баснословность сообщений о «предчувствии» наводнений [10] не позволяют относить их к достоверным.

Путаница с приведенным Ф. Х. Вебером текстом усугубилась, прежде всего, тем, что В. Л. Крафт в публикации 1780 г. сослался не на II, а на III том сочинения Ф. Х. Вебера [3, р. 41; 10, с. 40]. Историк флота В. Н. Берх, повторив эту описку, приписал Ф. Х. Веберу слова, в оригинале изначально отсутствовавшие: «Судя по рассказам их [рыбаков — А.Р., А.Л., Т.М., Н.З.], надобно полагать, что вода поднималась на 25 футов [7,62 м — А.Р., А.Л., Т.М., Н.З.] выше ординара» [11, с. 418]. Вслед за В. Л. Крафтом и В. Н. Берхом, русский литератор П. П. Каратыгин [8, с. 4], также ссылаясь в 1889 г. не на II, а на III том сочинения Ф. Х. Вебера, утверждал, что Ф. Х. Вебер привел сведения о высоте наводнения Невы 1691 г., равной 25 футам.

Однако в конце XIX в. академик М. А. Рыкачев отмечал, что высота наводнения 1691 г. составляла всего лишь «>10 футов [$>3,05$ м — А.Р., А.Л., Т.М., Н.З.]» в системе ординара Главной физической обсерватории [12, с. 103]. На условность определения года наводнения впервые обратил внимание гидролог А. П. Старков [2, с. 509]. Финский историк С. Кепсу вообще привел другую дату: согласно его предположению, наводнение

произошло в 1696 г. [13]. Разница (1696–1691=5 лет) согласуется со сведениями рыбаков, приведенными Ф.Х. Вебером.

В ХХ в. значение высоты наводнения 1691 г. подверглось дальнейшим метаморфозам. В 1988 г. гидролог Р.А. Нежиховский привел следующие сведения: «Согласно сведениям Архитектурно-планировочного управления Ленгорисполкома (1963 г.), наивысшие отметки на территории завода [имеется в виду Охтинское адмиралтейство, оно же Петрозавод — судостроительное предприятие, основанное Петром I и расположавшееся на Охтинском мысу при слиянии Невы и Охты — *A.P., A.L., T.M., H.Z.*], составляют 340–350 см БС... Предположив, что возвышение пола крепости над местностью примерно равно половине мощности культурного слоя (50–60 см), получим максимальный уровень 340 см БС, или 329 см над ординаром» [14, с. 30, 32]. На этих косвенных основаниях, не подтвержденных никакими ссылками на архивные источники, Р.А. Нежиховский счел наводнение Невы 1691 г. третьим катастрофическим после событий 7 (19) ноября 1824 г. и 23 сентября 1924 г. Заметим, что сам Р.А. Нежиховский писал следующее: «Конечно, точность установленной таким образом отметки максимума 1691 г. невысокая, однако она мало чем отличается от точности оценки максимальных уровней при большинстве наводнений, имевших место в XVII и в первой половине XIX в.» [14, с. 32]. Это, как мы убедимся в дальнейшем, — весьма ценное признание автора, до настоящего времени считающегося «крупным специалистом». Ретроспективное использование при этом Балтийской системы высот не обсуждалось ни автором, ни его последователями.

Приведем исторические сведения. Уровнемерные наблюдения в устье р. Охты при крепости Ниеншанц выполнялись шведами еще до 1681 г. При описании карты «Geometrisk Delineation uthaf Newa-Strömmen ifrän Ladoga-Sjön och Nötheborg intill Nyen-Skantz, men den öfriga delen intill Öster-Sjön är obiter och ungefär tecknat...», составленной шведским инженером-фортификатором Э. Е. Дальбергом в октябре 1681 г., историк Ингерманландии А. И. Гиппинг процитировал следующую фразу: «При буре с запада, севера и юго-запада вода у Ниена подымается на четыре локтя выше обычновенного и причиняет находящемуся там укреплению большой убыток» [15, II, с. 183]. Можно предположить, что в данном случае речь идет о характерном подъеме уровня на 2,4 м, если принять шведский локоть равным 59,4 см. К сожалению, уровнемерные наблюдения в Ниеншанце до сих пор не обнаружены. В то же время известно, что И. Г. Лейтман и Л. Эйлер активно использовали сведения о Балтийском море и Ладожском озере, которыми Россия в то время не располагала [16].

В данном контексте интерес представляет памятная медаль (рис. 1), выполненная Ф. Г. Мюллером на взятие Ниеншанца русскими войсками 1 (12) мая 1703 г. [17]. На плане местности, изображенном на оборотной стороне медали, отмечен только один мост через р. Охту.

Можно предположить, что на опоре этого моста и располагался уровнемерный пост. Однако значительное расстояние от моста до крепости не оправдано с точки зрения организации уровнемерных наблюдений. Логичнее было бы разместить обычновенный или подъемный мост в непосредственной близости от крепости, а наблюдения возложить на караульную службу. Возможно, что положение такого моста означено гравером точкой в середине р. Охты около ближайшего к реке бастиона. Существует версия, что уровнемерные наблюдения были уничтожены защитниками крепости перед капитуляцией. Можно только надеяться, что сведения о закономерностях режимов Охты и Невы, необходимые для обеспечения безопасного судоходства на приобретенных Швецией по Столбовскому договору 1617 г. новых территориях, могут храниться в зарубежных (прежде всего, шведских) архивах.



Рис. 1. Памятная медаль на взятие шведской крепости Ниеншанц

В связи с неоднозначностью трактовки самого факта наводнения 1691 г. остановимся на вопросе о репрезентативности дошедших до нас каталогов высот наводнений Невы, а также о состоянии первичных материалов уровнемерных наблюдений. Некоторые сведения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика сохранившихся каталогов высот наводнений Невы

№	Авторы сведений (описываемый период)	Особенности
1	Лейтман И.Г. (1721–1729 гг.)	1-й репрезентативный перечень
2	Крафт В.Л. (1721–1729 гг.)	Дополнения к первому перечню
3	Шретер Э.И. (1749–1777 гг.)	2-й репрезентативный перечень
4	Бауэр Ф.В. (1777 г.)	Французская футовая мера
5	Колодкин А.Е. (1824 г.)	Переоценка высоты <i>post factum</i>
5	Рыкачев М.А. (1691–1898 гг.)	Первый перечень ГФО, 1898 г.
6	Берг В.А. (1924 г.)	Несохранившиеся материалы
7	Мордухай-Болтовской А.И. (1691–1932 гг.)	Искажения сведений, дат, высот
8	Святской Д.О. (1300–1932 гг.)	Привлечение архивных сведений
9	Грушевский М.С., Лазаренко Н.Н. (1691–1955 гг.)	Два особых примечания к перечню
10	Нежиховский Р.А. (1691–1988 гг.)	Искажения сведений, дат, высот
11	Померанец К.С. (1703–2008 гг.)	Искажения сведений, дат, высот
12	Беспятых Ю.Н. (1703–1726 гг.)	Надежный, выверенный список

Примечания к табл. 2: 1) В обсуждении природы наводнений Невы (№ 1) принимали участие И. Г. Лейтман и Л. Эйлер. 2) В. Л. Крафт (№ 2) не сообщил источник получения сведений о двух дополнениях к перечню И. Г. Лейтмана; но одно из них (2 октября 1723 г.) опровергается другими источниками. 3) Наилучшими каталогами высот следует считать сохранившиеся опубликованные или рукописные перечни И. Г. Лейтмана (№ 1), Э. И. Шретера (№ 3), Д. О. Святского (№ 8), каталог высот наводнения 1777 г. Ф. В. Бауера (№ 4), а также список дат наводнений 1703–1726 гг., составленный Ю. Н. Беспятых. 4) Неудовлетворительными, соответственно, — А. И. Мордухая-Болтовского (№ 7), Р. А. Нежиховского и К. С. Померанца (№№ 10–11). 5) Обращают на себя внимание два примечания к перечню высот наводнений М. С. Грушевского и Н. Н. Лазаренко (№ 9) о том, что высота наводнения 1691 г. определена «по косвенным признакам», и что в 35 случаях из 123 (28,5%) высоты за период 1703–1874 гг., заключенные в круглые скобки, — не приведены «к одному нулю высот».

В заключение отметим важность дальнейших поисков материалов (прежде всего, архивных) по проблемам изучения исторических наводнений Невы, в том числе допетровского времени, а также недопустимость необдуманного использования непроверенных,

пусть даже опубликованных, работ во избежание клонирования фатальных ошибок в вопросе увеличения репрезентативного ряда наводнений с целью включения в научный оборот и обеспечения прогнозов на будущее.

Статья подготовлена в рамках госзадания FMWE-2024-0028.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Немиров Г.А.* Петербург до его основания: очерк истории Невы и местности нынешняго Петербурга до 1703 г. / Опыт истории Санкт-Петербургской Биржи в связи с историей Санкт-Петербурга, как торгового порта. СПб. Типография Императорской Академии наук. СПб. Типография Императорской Академии наук. 1888. Вып. I. 56 с.
2. *Старков А. П.* Причины наводнений в Петербурге и средства борьбы с ними // Записки Императорского Русского Технического Общества. 1899. № 8–9. С. 503–562.
3. *Krafft W. L.* Notices et remarques sur les débordemens de la Néva à St. Petersbourg, accompagnées d'une carte représentant la crue et la diminution des eaux du canal de Kronstadt, pour chaque jour de l'année 1777 // Acta Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae, pro Anno 1777. St. Petersbourg, 1780. Р. 39–62.
4. *Берх В. Н.* Подробное историческое известие о всех наводнениях, бывших в Санкт-Петербурге // Записки Государственного Адмиралтейского Департамента, относящиеся к мореплаванию, наукам и словесности. 1826. Ч. XI. С. 415–500.
5. *Богданов В. И.* Методологические аспекты изучения наводнений Невы // Астрономия и история науки. СПб.: «Искусство России», 1999. С. 113–127.
6. *Беспятых Ю. Н.* Наводнения в Петербурге Петра I. СПб.: «Историческая иллюстрация», 2013. 408 с.
7. *Weber F.-Chr.* Des veränderten Russlandes Zweiter Theil. Hannover. 1739. 247 s.
8. *Каратыгин П. П.* Летопись Петербургских наводнений 1703–1879 гг. СПб., 1888. 87 с.
9. *Богданов В. И.* О репрезентативном каталоге наводнений Невы как фундаментальной научной и практической проблеме (к 300-летию Санкт-Петербурга и Кронштадта) // Известия Русского географического общества. 2002. Т. 134. Вып. 6. С. 23–34.
10. [Крафт В. Л.]. Известия и примечания г. Академика Крафта о разлитиях Невы в Санктпетербурге, с присовокуплением таблицы прибыивания и убывания воды в Кронштадтском канале каждого дня 1777 году // Новые ежемесячные сочинения. 1795. Ч. CIX. С. 37–50; Ч. CXI. С. 74–93.
11. *Берг В. А.* Краткий анализ современного состояния методов прогнозов невских наводнений и пути их развития // Вопросы морских гидрологических прогнозов / Труды научно-исследовательских учреждений гидрометслужбы СССР. Сер. V. Гидрометеорология моря. Вып. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1941. С. 23–37.
12. *Рыкачев М. А.* О наводнениях в С. Петербурге и о возможности их предсказывать на основании метеорологических наблюдений // Записки по гидрографии. Вып. XIX. 1898. С. 99–124.
13. *Kency C.* Петербург до Петербурга. История устья Невы до основания города Петра / Перевод с финского Кюлли Сульг; ред.: А. И. Сакса, Е. Н. Кальчиков; фотографии: Т. Аланен; оформление: М. Инбар. СПб.: «Европейский Дом», 2000. 128 с.
14. *Нежиховский Р. А.* Вопросы гидрологии реки Невы и Невской губы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 224 с.
15. *Гиппинг А. И.* Нева и Ниеншанц / Вступительная статья А. С. Лаппо-Данилевского. СПб.: Императорская Академия наук, 1909. Ч. I. XVI с., 301 с.; Ч. II. 251 с.
16. [Leutmann J. G., Euler L.]. Ein Heftiger Sturm aus der See, welcher sich (den 12 October) um 10 Uhr Morgens anhub, und die Insuln dieser Stadt mehrentheils unter Wasser aetzte // Historische, genealogische und geographische Anmerckungen über die Zeitungen. St. 86, 88–91. 1729. С. 437–440, 445–460.
17. *Щукина Е. С.* Серия медалей Ф. Г. Мюллера на события Северной войны в собрании Эрмитажа. СПб.: Государственный Эрмитаж, 2006. 144 с.

ДИСКУССИЯ ОБ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ КРИТЕРИЯХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СРЕДНЕВЕКОВОЙ ТАВРИКЕ

B. V. Майко¹, д-р ист. наук

¹ФГБУН «Институт археологии Крыма РАН», Симферополь, Россия

DISCUSSION ON ARCHAEOLOGICAL CRITERIA FOR EARTHQUAKES IN MEDIEVAL TAURICA

V. V. Maiko¹, Doctor of History

¹FGBSI «Institute of Archeology of Crimea of RAS», Simferopol, Russia

На примере землетрясений средневекового времени в Крыму, рассматриваются выделенные критерии катастрофических событий, составляющие современную археосейсмологию. Даётся сравнительный анализ следов, видимых на остатках построек, дошедших до наших дней и обнаруженных в ходе раскопок. Делается заключение о необходимости комплексного подхода для аргументированных выводов о причинах той или иной природной катастрофы.

On the example of earthquakes of medieval times in Crimea, the selected criteria for catastrophic events that make up modern archaeoseismology are considered. A comparative analysis of the traces visible on the remains of buildings that have survived to this day and discovered during excavations is given. A conclusion is made on the need for an integrated approach to reasoned conclusions about the causes of a particular natural disaster.

Нет сомнений в том, что изучение крымских землетрясений античного и средневекового времени имеет огромное практическое значение. Такой длительный хронологический промежуток позволяет хотя бы примерно устанавливать интервал колебания земной коры и силу его воздействия. Однако для правильных выводов о том или ином землетрясении и времени самого события необходим анализ целой группы исторических источников.

Немногочисленные, но разнообразные письменные источники неоднократно привлекались специалистами [1], что в значительной мере избавляет от повторений. Тем не менее, отрывочность и субъективность их скопой информации делает выводы, предложенные на основе анализа только рукописной традиции, недостаточно аргументированными. Привлечение археологических источников в последние годы получило широкое распространение.

На основании данных многолетних раскопок средневекового укрепления Фуна и других фортификационных, монастырских и сельских объектов южного Крыма В. П. Кирилко предложил гипотезу о том, что внезапное прекращение похода генуэзских войск 1423 г. против Феодоритского государства связано с сильным землетрясением. Его археологическими критериями учёный считал следы, оставленные на стенах, а так же об разование закрытых комплексов в заполнении построек [2, с. 49–51].

На протяжении последних двух десятилетий активную работу в Крыму по поиску визуальных критериев землетрясений, фиксируемых на остатках стен тех или иных сохранившихся и обнаруженных в ходе археологических раскопок античных и средневековых построек, проводит А. М. Корженков [3]. Ученый логично пытается проецировать поведение современных построек при сейсмических событиях, для которых известны сила землетрясения и его эпицентральная область, на древние сооружения. Выделены

и типологизированы совершенно конкретные признаки, проверенные на целом ряде археологических объектов Таврики и античного, и средневекового времени. Это, по мнению исследователя, позволяет говорить о своеобразном направлении названном археосейсмологией.

Нам кажется важным сопоставить те или иные выделенные следы землетрясений, фиксируемые на том или ином археологическом объекте с этапами его функционирования, связанными с этими этапами перестройками и, конечно же, геологической ситуацией, которая, несомненно, эволюционно влияла на «поведение» здания. Для объектов, обнаруженных в процессе раскопок, необходим анализ стратиграфической ситуации, а, главное присутствие и характерные особенности закрытых комплексов. Образование последних связано, в первую очередь, с нестандартной, чаще всего, катастрофической ситуацией.

В качестве примера используем хорошо обследованные А. М. Корженковым и его коллегами христианский храм уникальной сохранности третьей четверти XIII в. у подножия горы Килиса-Кая [4], различные объекты средневековой Сугдеи, как дошедшие до наших дней, так и обнаруженные в ходе раскопок [5], а также объекты античного и средневекового времени, зафиксированные в ходе раскопок городища Артезиан на территории Керченского полуострова [6].

Яркий пример трещины, разрезающей несколько рядов каменной кладки, был подмечен исследователями на стене генуэзской лоджии в Сугдее [5, с. 119, рис. 14]. Такие трещины встречаются довольно часто и действительно могут свидетельствовать о резком колебании грунта. Справедливо ради надо отметить, что современные методы фиксации фассировок панцирь древних стен при помощи фотограмметрии, ныне обязательные для проведения раскопок архитектурных сооружений, позволяют их устанавливать безошибочно даже по фотографиям, что облегчает сбор базы данных.

Другие критерии, выделенные исследователями, не столь однозначны. Например, цоколи Генуэзской лоджии и храма Девы Марии на центральной площади средневековой Солдайи [5, с. 114, рис. 4]. Выступающие парапеты в данном случае — не следы тектонического воздействия, а признаки строительной периодизации, когда стены постройки более позднего периода сооружались с использованием в качестве фундаментов стен предшествующего сооружения. То же самое [5, с. 121, рис. 16г] можно сказать и относительно парапета, зафиксированного в кладке стен храма на участке 15 куртины, т. н. храма с гавитом.

Показателен случай с разновременными крепостными стенами Сугдее-Солдайи [5, с. 117, рис. 10а]. Перед нами — не разворот более поздней кладки генуэзской крепостной стены вследствие тектонического воздействия, а направление, вызванное сокращением площади города и исключением прекративших свою работу мастерских золотоординского времени.

Необходимо учитывать и месторасположение того или иного археологического объекта. Например, обрушение юго-западного угла храма у горы Килиса-Кая [4, с. 134, рис. 8], спровоцировало нахождение всей южной стены на краю балки, засыпанной при проведении раскопок в 2016 г. Этим же вызваны и трещины в центральной апсиде и южной стене притвора [4, с. 135, рис. 10, 11]. Парапет же храма [4, с. 138, рис. 15] — признак поздневизантийской строительной техники, в полном объеме примененной при сооружении храма. Это не следы землетрясения, а признак руководства работами высокопрофессионального византийского инженера. Согласно византийским же строительным приемам оформлены верхние рядки столпов [4, с. 139, рис. 17], поддерживающих центральный купол.

Примеры возведения последующих стен с использованием стен, предшествующих в качестве фундамента в средневековых городах полуострова и зажатых в крепостных стенах, многочисленны. Последовательная достройка первоначальных стен зафиксирована на раскопе VI и VIII в портовой части Сугдеи [7]. На этих раскопах ярко видна указанная последовательность возведения, при которой образование различных цоколей неизбежно (рис. 1, 1). Не менее характерно и использование особенностей самой скалы для возведения постройки (рис. 1, 2).

На наш взгляд для аргументированных выводов о том, являются те или иные следы, фиксируемые на стенах древних сооружений, следами тектонического воздействия, необходим учет целого ряда факторов. Прежде всего, нельзя не отталкиваться от особенностей возведения построек, которые применялись для фортификационных, общественных, культовых и обычных жилых, а, тем более, хозяйственных сооружений. Это, во-первых, не только различная техника кладки, но и разнообразные приемы, призванные уберечь здания от воздействия стихии. Под этими приемами есть смысл понимать тип строительного раствора и антисейсмические деревянные конструкции. Во-вторых, большое значение имеет возведение фундаментов, толщина которых превышала толщину самой стены, образуя различной конфигурации цоколи. В-третьих, непременным условием является указанное выше выяснение строительной периодизации одной и той же стены, ее достройки и перестройки. В-четвертых, максимально полный учет условий последовательности разрушения т. е. археологизации постройки. Это направление и характерные особенности развала стен и печей, развалы сосудов, другие предметы, лежащие на полах. В качестве примеров можно привести жилое помещение производственного комплекса хазарского времени первой половины — середины X в. (возможно начало 940-х гг.), в котором развалы сосудов и каменный жернов, располагались под разбившими их камнями, упавшими со стен. Не менее показателен пример пола полуподвала в помещении усадьбы в портовой части Сугдеи. Здесь на полу зафиксированы упавшие и сгоревшие блоки перекрытия верхнего этажа, «съехавшие» вниз гончарные круги, компактные развали разбитых сосудов (рис. 2, 1). На каменной вымостке пола в помещении 3 постройки средневекового времени на городище Артезиан на Керченском полуострове четко видны упавшие с полки амфоры (рис. 2, 3). На жернове, лежащем на полу в соседнем помещении, образовались трещины, трещины есть и на упавших блоках стен. Сами развалы стен обнаружены в виде компактного скопления, образовавшегося единовременно и более уже не восстановленного.



Рис. 1. Примеры образования каменных цоколей и смещения стен в средневековые при долговременном их использовании и достройке:

1 — портовая часть Сугдеи раскоп VIII;
2 — портовая часть Сугдеи раскоп VI



Рис. 2. Закрытые комплексы средневековой Таврики, образовавшиеся в результате катаклизмов и деревянные антисейсмические балки:
1—портовая часть Сугдеи раскоп VI; 2—городище Артезиан; 3—портовая часть Сугдеи раскоп VIII;
4—цитадель средневековой Сугдеи

При таком подходе, на наш взгляд, должно происходить грамотное накопление банка данных для выводов о времени, силе и периодичности древних землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ханаев В. В. Крымские землетрясения древности и средневековья: к истории вопроса // Материалы по археологии и истории античного и средневекового Крыма. 2008. Вып. I. С. 89–116.
2. Кирилко В. П. Крепостной ансамбль Фуны (1423–1475 гг.). Киев: Стилос, 2005. 269 с.
3. Корженков А. М., Овсяченко А. Н., Ларьков А. С., Мараханов А. В., Рогожин Е. А. Археосейсмологическое исследование древних исторических и археологических памятников в Феодосии, Крым // VII Международный симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов». Тезисы докладов. Бишкек, 2017. С. 26–29.
4. Захаров В. А., Корженков А. М., Ларьков А. С., Мусеев Д. А., Овсяченко А. Н., Андреева Н. В. Христианский храм у подножия горы Килиса-Кая (юго-восточный Крым): вероятные следы геокатастроф // Геофизические процессы и биосфера. 2024. Т. 23. № 1. С. 129–147.
5. Корженков А. М., Овсяченко А. Н., Ларьков А. С., Захаров В. А. Находки следов сильных древних землетрясений в Судакской крепости // Первый Всероссийский историко-археологический форум «Русь — Европа — Причерноморье — Византия». Симферополь: Н. Оріанда, 2021. С. 110–127.
6. Винокуров Н. И., Корженков А. М., Родкин М. В. К оценке сейсмической опасности района Керченского пролива по данным археосейсмологии // Вопросы инженерной сеймологии. 2015. Т. 42. № 2. С. 51–66.
7. Майко В. В., Гукин В. Д. Использование предшествующих построек при застройке портовой части Сугдеи во второй половине X–XIV в.: архитектурный и технологический аспекты // Архитектурная археология. 2024. № 6. С. 123–133.

Пятый критерий — наличие конкретных антисейсмических приспособлений, прежде всего, деревянных балок, специально проложенных между каменными рядами кладок. Такие примеры хорошо известны при раскопках средневековой Сугдеи (рис. 2, 3, 4). В шестых, наиболее узкая датировка слоя на основе корреляции всех датирующих находок.

Таким образом, сопоставление критериев, выделенных А. М. Корженковым, с конкретной археологической ситуацией и теми шестью критериями, которые предлагаем мы, — залог надежности того или иного вывода. По сути дела, надо говорить о критериях закрытого комплекса, включающего и следы на стенах, и характерное направление развала их верхних частей, других каменных конструкций, керамических сосудов и других находок. И, главное, сам стратиграфический горизонт в котором, все это фиксируется и который, по возможности, надо датировать наиболее узкими хронологическими рамками. Таким образом, следы на стенах, выделенные А. М. Корженковым, и, несомненно, связанные с резкими подвижками земной коры, — только один из элементов данного «археосейсмического» закрытого комплекса.

**ПРОБЛЕМНЫЕ СЕЙСМОСОБЫТИЯ
ВЕРХНЕГО И СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ 1597, 1608, 1806 гг.:
НОВЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ И НОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ**

С. Ю. Нечаев^{1,2}, канд. филос. наук

¹Библиотека РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

**PROBLEM SEISMIC EVENTS
OF THE UPPER AND MIDDLE VOLGA REGION 1597, 1608, 1806:
NEW HISTORICAL SOURCES AND NEW PROBLEMS**

S. Yu. Nечаев^{1,2}, Cand. Sc. (Philosophy)

¹Russian Academy of Sciences Library, St. Petersburg, Russia

²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

В научный оборот вводятся первоисточники макросейсмических данных о природных событиях в Поволжье. Обговариваются варианты интерпретации, вероятные оценки, взаимосвязанность явлений.

Primary sources of macroseismic data on natural events in the Volga region are introduced into scientific circulation. Interpretation options, probable estimates, and the interconnectedness of phenomena are discussed.

Обсуждаемые районы Приволжского федерального округа расположены в пределах зон, характеризующихся сейсмической интенсивностью менее VI баллов [1]. Так или иначе, происходившие на данных территориях сейсмособытия являются предметом дискуссии относительно их природы [2, 3] и каталогизации [4–6], как и объектом изучения сопутствующих явлений [7, 8]. Привлечение новых исторических источников позволяет уточнить характеристики известных и дополнить список ранее неизвестных событий в Нижнем Новгороде, Козьмодемьянске и Казани.

Оползень 28 июня 1597 г. в окрестностях Нижнего Новгорода уничтожил Печерский Вознесенский монастырь, располагавшийся на волжском берегу, и стал резонансным событием для всего русского летописания, что постепенно обрастило несвойственными деталями. В каталоге [4] дана ссылка на более позднюю новгородскую летопись (Великий Новгород), в которой утверждается о действительном землетрясении с ошибочной датировкой «1596 г.». Более того, говорится, что «вверх по реке Оке слобода 150 дворов погибе совсем сквозе землю, и ни един человек не остался» (к рассматриваемому событию отношения не имеющее, см. далее). На основании этих данных землетрясение было параметризовано: $M = 3,7$, $I_0 = VII$, правда, с комментарием «возможно, оползень» [5], и затем включалось в сейсмические каталоги Поволжья. В работе [2] привлечен другой, но также отдаленный во времени летописный список, в котором речи о землетрясении не идет, из чего автор делает вывод о крупном оползне на берегу Волги, «какие случались там и раньше, и позже». Кроме того, в этом же списке добавлено, что за 400 лет «тако же ползла гора, яко же и Печерская, и засыпало 150 дворов и с людьми, и с скотом» [9, с. 146]. Получается, что и приведенные выше аналогичные сведения относятся к периоду XII–XIII вв., когда на Оке сошел подобный оползень.

Спустя 40 лет, в 1636 г., на месте побывал немецкий путешественник Адам Олеарий, будучи секретарем голштинского посольства в Персию через территорию России, о чем

и рассказал в своих путевых заметках. Отправляясь вниз по реке из Нижнего, где для их дипломатической миссии русскими плотниками был выстроен корабль, Олеарий пишет: «Едва, однако, мы в 2-х верстах под городом прошли за именье [дьяка] Грамотина, л[евый берег], напротив Печерского монастыря, пр[авый берег], как мы уже попали на мель и засели. Пришлось заносить якорь и с большими трудами в течение 4-х часов стаскивать корабль. На другой день... проехав с версту дальше, мы снова засели, однако скоро сошли с мели» [10, с. 360–361]. К этому времени комплекс монастыря был заново отстроен выше по Волге как раз «на версту», где и располагается сегодня. Возможно, Олеарий указал на следы не размытого тела оползня, поскольку двигавшиеся массы не только снесли монастырь, но выступили в реку и, по некоторым описаниям, вызвали цунами-подобные волны, которыми на берег выбросило монастырские суда.

Оценивая действие оползня и спровоцированного им цунами, авторы работы [7] ссылаются на «Нижегородский летописец», изданный краеведом А. С. Гацкским еще в 1886 г. [11], но не использованный в каталогах [4, 5] и другими авторами. А. С. Гацкий собрал воедино известные тогда семь списков летописца. Однако уже в наше время, в 2006 г., было издано более полное исследование нижегородских памятников [12], которое вобрало все имеющиеся списки числом 29. Методом текстологического анализа автор установила протографы, текст которых лег в основу других списков, из чего можно вычленить следующие ключевые детали [ср. 11, с. 36–43, 106–109; 12, с. 157, 203 и др.].

Точной датировкой события является 18 (28) июня 1597 г., «в третьем часу ночи», т. е. в 22 часу [см. 13], «на память святого мученика Леонтия», что по православному календарю действительно приходится на 18 июня (старый стиль). Перед катастрофой, «всего на версту, явившись щель великая на земли поверх монастыря, а монастырь стоит в полу-горе», и архимандрит с братией «церковную утварь за неделю до того времени вынесли из храмов вон», т. е. более недели длилась подготовка сползания, линия отрыва составила свыше 1000 м. Во время катастрофы «оползла гора... да прошла под ту гору, на которой монастырь стоит, и с лесом, и вышла в Волгу сажень на 8, а инде и больше» (у А. С. Гацкого появилась поздняя приписка «сажень на 50»), «а которые струги были на реке у берегу... и те суды стали на брегу на сухе, сажень 20 от воды и больше... а в Волге учинися земли бугры великие» (у А. С. Гацкого — «на реке поднялось страшное волнение»), однако о волнении на реке ничего не сообщается, а «буграми» назван сам оползший массив. После схода оползня «пошли из горы ключи великие», таким образом, вероятной причиной катастрофы явился повышенный уровень грунтовых вод.

Оползень выступил в реку вовсе не на 50 саж (~100 м), как считалось ранее, а всего на 8 саж, и возникшим валом воды суда (небольшие струги) смыло при погружении оползня в реку. По оценкам авторов работы [7] на основе «археологических изысканий», площадь оползня составила 300 на 200 метров. Это суждение требует проверки, учитывая более чем километровую линию отрыва. Принципиально, что о «страшном волнении» на Волге ни в одном из первоначальных списков не говорится, поэтому воздействие цунами может быть преувеличено. О землетрясении также не упоминается, и справедливым образом оно было изъято из оборота в каталоге [6], правда, без общедоступных разъяснений.

Козьмодемьянское землетрясение 12 сент. 1806 г.— историко-сейсмологический феномен. Как и с предыдущим, нетектоническая (оползневая) [2] или тектоническая [3] природа этого события оставалась дискуссионной. В каталоге [5] были присвоены сопоставимые параметры: $M=3,7$, $I_o=VI$. Сопровождавшее землетрясение «нарочитое колебание на воде» так же выбросило на берег Волги несколько судов, а моделирование этого процесса (как и для 1597 г.) «подтвердило локальность явления цунами в реках» [8]. Между тем имев-

шиеся сведения ограничивались только одним пунктом наблюдения, что «для густо заселенной территории по Волге совершенно неправдоподобно» [2].

Действительно, дополнительные сведения были присланы краеведом и журналистом Д. Н. Зиновьевым в личном письме секретарю Академии наук: «о подземных толчках, отмеченных в сентябре 1806 г. во многих местах Казанской губернии», как записано в академической летописи [14, с. 52–53]. Документ сохранился в Санкт-Петербургском филиале Архива РАН (Ф. 1. Оп. 3. Ед. хр. 75. Л. 130), но до текущего момента никем не привлекался. Автор письма пишет (краткое извлечение), что в Козьмодемьянском, Чебоксарском и Ядринском уездах «чувствовали после полудни землетрясение, продолжавшееся несколько секунд, от чего *в некоторых местах печи получили тресчины*». Помимо того, что указаны два населенных пункта расстоянием до 50 км на юго-восток и юго-запад от Козьмодемьянска, интенсивность в них оценивается не менее VI баллов по шкале MSK-64. В свою очередь, оценка интенсивности в Козьмодемьянске должна быть не менее VII баллов, учитывая образование на поверхности воды волн.

Козьмодемьянское землетрясение, теперь выбывающее из общей картины [1], было изъято из оборота в каталоге [6]. Произошло это, по-видимому, по аналогии с оползнем 1597 г. и из-за отсутствия достаточной макросейсмической информации. Привлечение нового исторического источника должно способствовать возвращению землетрясения в каталог, которое потребует отдельного всестороннего изучения.

Сейсмическое событие 17 апр. 1608 г. в Казани в историко-сейсмологической литературе не обсуждалось. В Библиотеке Российской академии наук (БАН) хранится уникальная рукопись «Летописец небесных знамений», изданная поэтому факсимile включая самостоятельный том ее исследований [15], где и отражено данное событие. Историкам не удалось установить имя писца, но с определенной вероятностью можно утверждать, что во время землетрясения он жил в Казани и был наследником Спасо-Преображенского монастыря. Оставленная им запись звучит так: «В лета 7116-го [1608] апреля в 7 день, по Пасце вторыя неделя, *в четверг, в час второй надесять...* во граде Казани и по всей Русской земли по всем градом бысть трясение земли» [15, с. 192, 503].

Поскольку составитель рукописи уделяет большое внимание различным явлениям природы, в том числе другим землетрясениям, происходившим в разные времена, к его сообщению о землетрясении в Казани следует отнести с доверием. Однако в записи вызывает вопрос выражение «по всей русской земле по всем городам», о чем нет сведений в летописных источниках. Выражение могло означать получение известий издалека, по Волжскому торговому пути с юга. Это обстоятельство побудило проверить вариант проявления в Поволжье удаленного очага разрушительного землетрясения.

По англоязычному каталогу исторических землетрясений Персии [16, р. 49, 159] и каталогу [6], подходящее казанскому событию землетрясение произошло 20 апр. 1608 г. в провинции Гилян, на юго-западном побережье Каспийского моря. Значение магнитуды составило $M = 7,6$. Макросейсмическое описание гласит, что *4 числа месяца мухаррам* 1017 г. (исламский календарь) мощное землетрясение произвело значительный ущерб на огромной территории, толчок был связан с сильными движениями грунта более чем в 300 км от эпицентра, в Каспийском море возникли большие волны, которые обрушились на побережье и привели в панику людей и животных.

При переводе даты казанского события в григорианскую систему получится 17 апр. 1608 г., что не совпадает с каталогной датировкой землетрясения в Персии. Однако в примечании к [16, р. 182] записано, будто астролог персидского шаха и современник произошедшего некорректно датировал землетрясение *2 числом месяца мухаррам*, т. е. 18 апреля (при прямом переводе), что «не согласуется с повествованием о событиях, окружавших катастрофу, и астрологическими выкладками, которые он также приводит».

Но если автор описания допускал противоречивые фразы и мог быть плохим астрологом, сомнительно, чтобы он перепутал дату столь выдающегося сейсмического события.

Несоответствие дат теперь составляет разницу в один день и объясняется следующей погрешностью. Казанский автор сообщил не только дату, но и время суток события: «в час второй надесять», т. е. «в 12 часу». Суточный счет на Руси происходил не равными частями, а дневными и ночных часами, максимальным количеством часов светлого или темного времени суток в году было 17. С 6 по 22 апреля было 14 дневных и 10 ночных часов [см. 13]. Тогда указание «в 12 часу» от восхода солнца является промежутком местного времени 14:35–15:35 (GMT+3), так что можно с большей точностью вычислить номер юлианского дня (Julian day number). Результат вычисления (2308477) с помощью онлайн-конвертера дат убеждает нас, что *датировка 7(17) апр. 1608 г. коррелирует с мусульманской датой 2 мухаррам 1017 г.*, которую сообщил персидский автор.

Сейсмические колебания в Поволжье от удаленных очагов не является чем-то экстраординарным. Таковые были зафиксированы неоднократно, например, во время Красноводского землетрясения 1895 г. и Каспийских землетрясений 2000 г. Возможно, имело место локальное сейсмособытие, но тогда это будет невероятным совпадением датировок из разных систем календарей, с учетом известного времени суток события.

ЛИТЕРАТУРА

1. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–121.
2. Никонов А. А. Проблема выделения нетектонических землетрясений на Восточно-Европейской платформе в оценке ее сейсмической опасности // Недра Поволжья и Прикаспия. 1996. Вып. 13. С. 42–49.
3. Татевосян Р. Э. Историческая сейсмичность Среднего Поволжья // Макросейсмические исследования / Р. Э. Татевосян. М., 2013. С. 171–215.
4. Мушкетов И. В., Орлов А. П. Каталог землетрясений Российской империи. СПб., 1893.
5. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М., 1977.
6. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. М., 2012.
7. Диденкулова И. И., Зайцев А. И., Красильщиков А. А., Куркин А. А., Пелиновский Е. Н., Ялчинер А. С. Нижегородское цунами 1597 г. на реке Волге // Известия Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова. Прикладная математика и механика. 2003. Т. 4. С. 170–180.
8. Диденкулова И. И., Зайцев А. И., Пелиновский Е. Н. Цунами 1806 г. в Козьмодемьянске на Волге // Морской гидрофизический журнал. 2007. № 1. С. 73–76.
9. Летописцы последней четверти XVII в. М., 1968. (Полное собрание русских летописей. Т. 31).
10. Олеарий А. Описание путешествия в Московию и через Московию в Персию и обратно. СПб., 1906.
11. Гацкий А. С. Нижегородский летописец. Н. Новгород, 1886.
12. Шайдакова М. Я. Нижегородские летописные памятники XVII в. Н. Новгород, 2006.
13. Черепнин Л. В. Русская хронология. М., 1944.
14. Летопись Российской академии наук. Т. 2: 1803–1860. СПб., 2002.
15. Летописец небесных знамений. Т. 2: Тексты, исследование, комментарии. СПб., 2018.
16. Ambraseys N. N., Melville C. P. A history of Persian earthquakes. Cambridge University Press, 1982.

СИЛЬНЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ФЕРГАНСКОМ УЧАСТКЕ ВЕЛИКОГО ШЕЛКОВОГО ПУТИ

А. М. Корженков¹, д-р геол.-мин. наук,
А. А. Анарбаев², д-р ист. наук, Л. А. Корженкова³

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

²Национальный центр археологии АН Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

³Институт геоэкологии имени Е. М. Сергеева РАН, Москва, Россия

STRONG HISTORICAL EARTHQUAKES ON THE FERGHANA SECTION OF THE GREAT SILK ROAD

А. М. Корженков¹, Dr. Sc.,
А. А. Анарбаев², Dr. Sc., Л. А. Корженкова³

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Center of Archeology of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent, Uzbekistan

³Sergeev Institute of Geoeontology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Территория Восточного Узбекистана (Ферганской впадины) входит в число высокосейсмичных регионов Республики, где в далеком прошлом происходили и будут происходить в будущем 9-балльные катастрофические землетрясения. Для оценки сейсмической опасности территории с максимально возможным землетрясением M_{max} с учетом периода повторяемости сильных землетрясений инструментальные сейсмологические данные за последние 100 лет оказались недостаточными. И в этом плане информация о произошедших древних землетрясениях в Наманганской области вносят ясность в понимание процессов повторяемости сильных землетрясений с $M \geq 7,5$. Полученные при исследовании археологических и исторических памятников археосейсмологические данные позволили выявить и параметризовать сильные сейсмические события в Ферганской впадине, произошедшие за последние 3,3 тысячи лет. Эта статья — первая попытка продлить короткий (100 лет) каталог инструментальных землетрясений, проникнув в глубь веков. Хотя данная работа пока еще не может служить полной сводкой о сильных землетрясениях Ферганской долины, но и она показывает, что сейсмические катастрофы в регионе случаются раз в несколько сот лет. Полученные материалы должны быть учтены при новой оценке сейсмической опасности Ферганской впадины. Дальнейшие археосейсмологические и палеосейсмологические исследования, с уточнением сейсмической опасности, помогут более полно охарактеризовать режим сильных землетрясений на территории, где сходятся границы трех государств Средней Азии.

The territory of Eastern Uzbekistan (Ferghana Valley) is one of the highly seismic regions of the Republic, where $I_o=IX$ catastrophic earthquakes occurred in the past and will occur in the future. To assess the seismic hazard of an area with the maximum possible earthquake of M_{max} , taking into account the period of recurrence of strong earthquakes, instrumental seismological data over the past 100 years have proved insufficient. In this regard, information about ancient earthquakes in Namangan region provides clarity in understanding the recurrence of strong earthquakes with a magnitude of $M=7,5$. The archaeoseismological data obtained during the study of archaeological and historical monuments made it possible to identify and parameterize strong seismic events in the Ferghana Valley that have occurred over the past 3,3 thousand years. This report is the first attempt to extend a short (100-year) catalog of instrumental earthquakes, going back centuries. Although this work cannot yet serve as a complete summary of the severe earthquakes in the Ferghana Valley, it also shows that seismic disasters in the region occur once every few hundred years. The obtained materials should be taken into account in the new assessment of the seismic hazard of the Ferghana Valley. Further archaeoseismological and paleoseismological studies, clarifying its seismic hazard, will help to more fully characterize the regime of strong earthquakes in the territory where the borders of the three Central Asian states converge.

Инструментальные записи сильных землетрясений в Ферганской долине охватывают период, отстоящий от нас всего на сто лет. Отрывочные исторические свидетельства продолжают летопись сильных сейсмических событий в регионе до XV в. Этих данных совершенно недостаточно для полноценной оценки сейсмической опасности территории. Так, например, при строительстве атомной электростанции её строители требуют от сейсмологов данные о сильных землетрясениях в регионе за последние 10000 лет! Такие данные могут быть получены с помощью методов палеосейсмологии и археосейсмологии. Если немногочисленные местные работы по изучению следов древних землетрясений, выраженных в рельефе, известны, то описание сейсмических деформаций в археологических и исторических памятниках приводятся нами впервые.

В нашей работе мы применили традиционные методы археосейсмологии, а также подход, разрабатываемый одним из авторов на протяжении последних 30 лет: использование кинематических индикаторов деформации для выявления следов землетрясений, а также параметризации исторических сейсмических событий. Работы велись как на археологических раскопках, так и на сохранившихся до сих пор исторических памятниках (рис. 1).

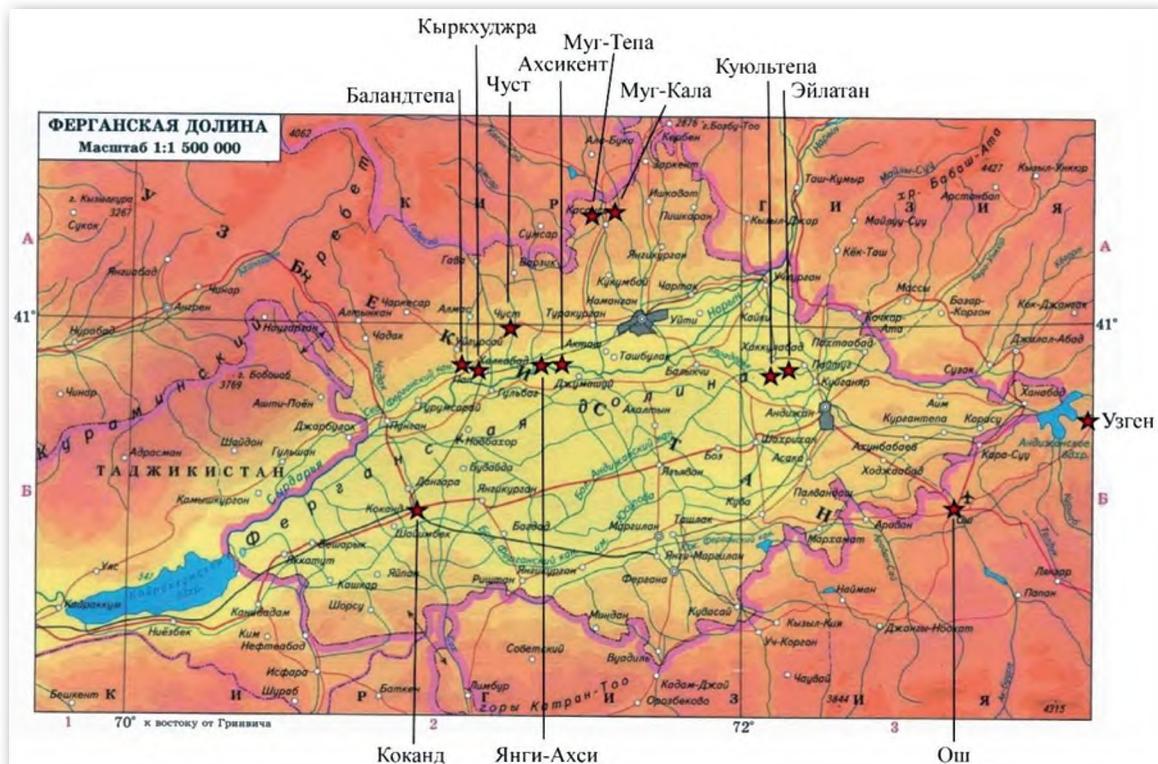


Рис. 1. Топографическая карта Ферганской впадины:

«Звездочки» — местоположения исследованных археологических и исторических объектов

В результате были получены данные о десяти сильных сейсмических событиях в Ферганской долине, не известные до сих пор сейсмологической общественности (табл. 1). Анализ данных, внесенных в таблицу, показал, что на территории самой впадины, а не только ее горного обрамления, могут возникать сильные землетрясения с $Ms = 7,7$, что приводит к разрушениям $Io = X$ баллов по шкале MSK-64. Источниками этих сейсмических катастроф являются местные разломы, приводящие к формированию адыров — предгорных надразломных складок и внутривпадинных поднятий. Подобные землетрясения приводят не только к тяжелейшим разрушениям населенных пунктов, а также

объектов водной и транспортной инфраструктуры. Эти катастрофы приводили к изменениям в государственном устройстве, цивилизационном развитии региона. Такие сейсмические события повторяются на территории Ферганской долины раз в несколько сот лет.

Таблица 1

Список сильных исторических землетрясений (с $M \geq 5,0$) в Ферганской долине

№	Название землетрясения	Дата, время	Географические координаты		Глубина, км	Магнитуда, $M_{L\text{new}} (M_{W\text{new}})$
			φ, с. ш.	λ, в. д.		
1	Чустское*	середина XIII	41°01'	71°13'	15–20	6,5–7,0
2	Чустское* (1-е из дуплета)	первая половина X в. до н. э.	41°01'	71°13'	15–20	6,5–7,0
	Чустское* (2-е из дуплета)	рубеж X–IX вв. до н. э.	41°01'	71°13'	15–20	6,5–7,0
3	Эйлатан*	Начало I в. до н. э.	40,91	72,15	15	$M_S = 7,6$
4	Ахсикет*	I в. до н. э., после 90-х гг.	40,90	71,40	15	$M_S = 7,7$
5	Куюлтепа*	IV–V вв. н. э.	40,91	72,15	15–20	6,5–6,7
6	Кыркхуджра*	Конец IV — начало V вв. н. э.	41,50	71,06	10–15	6,8–7,0
7	Баландтепа*	Конец VI — начало VII вв. н. э.	41,50	71,06	10–15	6,8–7,0
8	Баландтепа*	1-я четверть VIII в.	41,50	71,06	10–15	6,5–7,0
9	Ахсикет*	1-я половина XII в.	40,53	71,27	15–20	6,0–6,5
10	Наманганское	1494 г.	41,00	71,60	6	5,1–5,5
11	Ахсинское	1620 г.	40,90	71,40	6	5,8–6,0
12	Наманганское	1908 г., 24.03, 22:07	40,90	71,00	26	5,4–5,7
13	Наманганское	1912 г., 23.01	41,00	71,70	12	5,2–5,6
14	Наманганское	1927 г., 12.08, 10:22:47	41,00	71,60	14	6,0–6,1
15	Наманганское (афтершок)	1927 г., 27.08	41,00	71,60	20	5,5
16	Наманганское	1941 г., 13.08, 00:55:53	40,80	71,30	20	5,1–5,5
17	Яртепинское	1942 г., 18.01, 16:36:31	41,10	71,60	21	5,9–6,0
18	Балыкчинское	1966 г., 30.04, 13:41:10	41,15	71,97	18	5,0–5,4
19	Папское	1984 г., 17.02, 23:26:52.9	40,85	71,06	20	5,5–5,6

Примечание: * — выявленные нами археосейсмологическими методами древние землетрясения, для которых приведены средние значения глубины землетрясения в земной коре, характерные для региона.

Так, например, было установлено, что древний город Эйлатан погиб в I в. до н. э. вследствие сильного землетрясения. Именно в это время сильно пострадал столичный город Фаргана (Ахсикет). Здесь нами также был обнаружен выход сейсмического очага на поверхность, а также другие сильные деформации строительных конструкций, построенных до этого времени. Магнитуда сейсмической катастрофы ($M = 7,6$) была

определенена нами по максимальной обнаруженной нами величине смещения по сейсмогенному разрыву, вышедшему на поверхность прямо на территории древнего городища. Сейсмические колебания полностью уничтожили или значительно деформировали все постройки, серьезно повредили и разрушили городские стены. Поэтому, видимо, новые цари Ферганской долины после 90-х гг. до н. э. построили себе новую резиденцию на Мугтепе, которая была упомянута в китайском источнике «Ханьшу» как «Гуйшувань». По археологическим данным удалось определить, что вышеупомянутые монументальные фортификационные сооружения столицы были возведены между 104—90-х гг. до н. э., а само X-балльное землетрясение произошло, ориентировочно в 91—90 гг. до н. э. Оно охватило всю Ферганскую долину, но особенно сильно пострадали города и поселения Северной Ферганы. Ярким примером являются расседания массивных крепостных стен на цитадели и шахристане города Фаргана (Ахсикет). Возможно, что сейсмогенное разрывообразование, вышедшее на поверхность в древних Ахсикенте и Эйлатане, произошло в одно и то же время. Аналогичное сильное землетрясение произошло позже: в XI — первой половине XII в. Следы этого сейсмического события были прослежены нами на ряде объектов Караканидского возраста в шахристане и рабаде.

Полевые исследования в Ферганской долине, а также в камеральных условиях в городах Москва и Ташкент были проведены при финансовой поддержке фундаментального гранта Узбекистан Ф3-202011021 Национального центра археологии АН Республики Узбекистан, а также госпрограммы исследований Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН по теме лаборатории № 304 «Исследования режима сильных землетрясений и геодинамики Альпийско-Гималайского горного пояса и относительно стабильных территорий Восточно-Европейской платформы с Балтийским щитом на основе изучения палеосейсмичности и альпийской палеогеодинамики» на 2022—2024 гг.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЗОНА ИЗВЕРЖЕНИЯ
В ПРОШЛОМ ПО ПАЛИНОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ
НА ПРИМЕРЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ КАЛЬДЕРЫ КУРИЛЬСКОЕ ОЗЕРО
НА КАМЧАТКЕ 7600¹⁴С ЛЕТ НАЗАД**

В. Г. Дирксен¹, канд. геогр. наук,
О. В. Дирксен¹, канд. геогр. наук, М. А. Назарова¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

**SEASON DETECTION
OF PAST VOLCANIC ERUPTION USING POLLEN DATA:
A CASE STUDY OF THE 7600¹⁴C YEARS BEFORE PRESENT
KURILE LAKE CALDERA ERUPTION IN KAMCHATKA**

V. G. Dirksen¹, Ph D.,

O. V. Dirksen¹, Ph D., M. A. Nazarova¹

¹Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Представлены результаты реконструкции воздействия на экосистемы крупнейшего в голоцене на Камчатке кальдерообразующего извержения Курильское озеро 7600¹⁴С л. н. и определения сезона этого события по палеоданным. Состав пыльцевых спектров из тефры начальной фазы извержения по двум разрезам позволяет заключить, что извержение произошло в начале сезона вегетации (июне).

Reconstruction of impact on ecosystems of the 7600¹⁴C yr BP Kurile Lake caldera-forming eruption, the largest in Kamchatka during the Holocene are represented as well as revealing its season based on palaeodata. Pollen spectra obtained from tephra of the initial eruptive phase from two sediment sections suggest that the eruption occurred at the beginning of vegetation season (June).

Интерес к вулканическим извержениям прошлого очевиден: самые крупные из них не имеют современных аналогов, как по своим параметрам, так и по экологическим последствиям. При этом сильнейшие (VEI6), за период инструментальных наблюдений, исторические извержения не только приводили к долговременным изменениям экосистем, но и к значимым, пусть и краткосрочным, изменениям климата. Источником информации о воздействии извержений прошлого на природную среду и постэруптивных процессах служат записи с высоким временным разрешением, такие, как годовые кольца деревьев, керны льдов, а также данные различных экологических прокси, в том числе палинологические. По мере накопления подобного рода данных, сформировалась тефрапалеоэкология — направление, основанное на общем подходе: выявление изменений сигналов в палеозаписи до и после конкретных извержений, фиксируемых в колонках отложений слоями соответствующих вулканических пеплов [1]. Интерпретация полученных данных базируется на выделении следующих фаз в палеозаписи, или синхронных уровней: (1) «фон» — условия до извержения, часть записи ниже слоя тефры; (2) «влияние» — условия сразу после извержения, часть записи непосредственно над слоем тефры и (3) «восстановление» — постэруптивные условия. При этом палеоданные из тефры почти не используются в реконструкциях, а их экологическая интерпретация довольно противоречива [2]. Однако именно эти данные несут информацию о состоянии природной среды в момент извержения, в том числе, о времени года.

Данные о сезоне (времени года) извержения достаточно широко используются, в частности, в климатическом моделировании, гляциологии, изучении вулканогенной

динамики водных и наземных экосистем. Сезон извержения, наряду с мощностью события и местоположением эруптивного центра, относится к факторам, определяющим масштабы и направленность постэруптивных процессов. Следовательно, данные о сезоне события представляют особую значимость для моделирования и оценок возможных угроз и экологических последствий в регионах умеренных и высоких широт (включая большую часть территории нашей страны), где сезонность ясно выражена.

В развитие подходов и методов тефрапалеоэкологии, изложенных выше, мы предлагаем собственную методику получения и интерпретации данных, позволяющих устанавливать сезон доисторических извержений. В качестве источника информации о моменте начала извержения используется тефра его начальной фазы. Образцы отбираются из наземных почвенно-пирокластических чехлов (ППЧ), в разрезах которых можно уверенно идентифицировать тефру начальной фазы конкретного извержения. Корреляция удаленных друг от друга разрезов ППЧ проводится на основе тефрохронологических данных и выделения синхронных уровней [3]. К интерпретации палеоданных привлекаются материалы современных фенологических наблюдений, а также имеющиеся данные по изменению климата региона в прошлом [4]. В качестве апробации предлагаемой методики была выполнена обратная задача: установлен сезон извержения по палеоданным для одного из крупнейших исторических извержений (VEI6) вулкана Новарупта на Аляске в 1912 г. Полученные результаты практически совпали с известной датой извержения [5]. При этом, безусловно, новая методика требует дальнейшей верификации, как по датированным событиям, так и по извержениям прошлого с неизвестным сезоном.

В данной работе представлены результаты реконструкции воздействия на природную среду, а также определения сезона извержения кальдеры Курильское озеро (КО) 7600^{14}C л. н., крупнейшего в голоцене на Камчатке (VEI7). Это событие достаточно хорошо изучено к настоящему времени. Характер извержения был катастрофический: объем изверженных продуктов составил $\sim 140\text{--}170 \text{ км}^3$; площадь поражения в результате воздействия раскаленной пирокластики достигла $\sim 5000\text{--}6000 \text{ км}^2$ [6]. Тефра КО зафиксирована в виде кислотных пиков в кернах льда Гренландии.

На Южной Камчатке были опробованы два разреза ППЧ, в которых была вскрыта подошва слоя тефры КО: взрывная воронка (маар) у борта кальдеры (11 образцов), вблизи эруптивного центра, и останец отложений КО в долине р. Орешкова (10 образцов), на удалении от центра. Снизу вверх в ППЧ были опробованы следующие слои (рис. 1): (1) развитая погребенная почва, вмещающая горизонты кислых тефр, включая тефру извержения вулкана Ксудач (KC_4) 8800^{14}C л. н.; (2) тефра КО от 0,2 до 5 м; (3) туфы КО до 150 м; (4) пачка переотложенной пирокластики КО более 2 м и/или отложения обвала выше кровли туфов КО; (5) пачка гумусированной переотложенной пирокластики и/или примитивная почва, вмещающие базальтовую тефру извержения вулкана Ильинский (ИЛ).

Образцы, отобранные из двух разрезов, характеризуют следующие синхронные уровни, снизу вверх: (1) период вулканического покоя, прерванный извержением KC_4 8800^{14}C л. н.— фоновые условия, в основном, определяемые климатом; (2) начальная фаза извержения КО 7600^{14}C л. н.; (3) нестабильные условия сразу после извержения; (4) начало почвообразования — процесс восстановления экосистемы к исходному состоянию.

Обработка образцов для палинологического анализа проводилась по стандартной методике [7]. Процентное содержание всех компонентов спорово-пыльцевых спектров (СПС) рассчитывалось от их общей суммы. В пяти образцах палеозаписи р. Орешкова с низкой концентрацией таксонов (меньше 150 зерен) процентные соотношения не определялись, однако их присутствие в СПС на диаграмме отмечено. Названия таксонов СПС следуют номенклатуре растений-источников. Палеозаписи двух разрезов ППЧ, сопоставленные по синхронным уровням, представлены в виде диаграммы избранных таксонов (рис. 2).

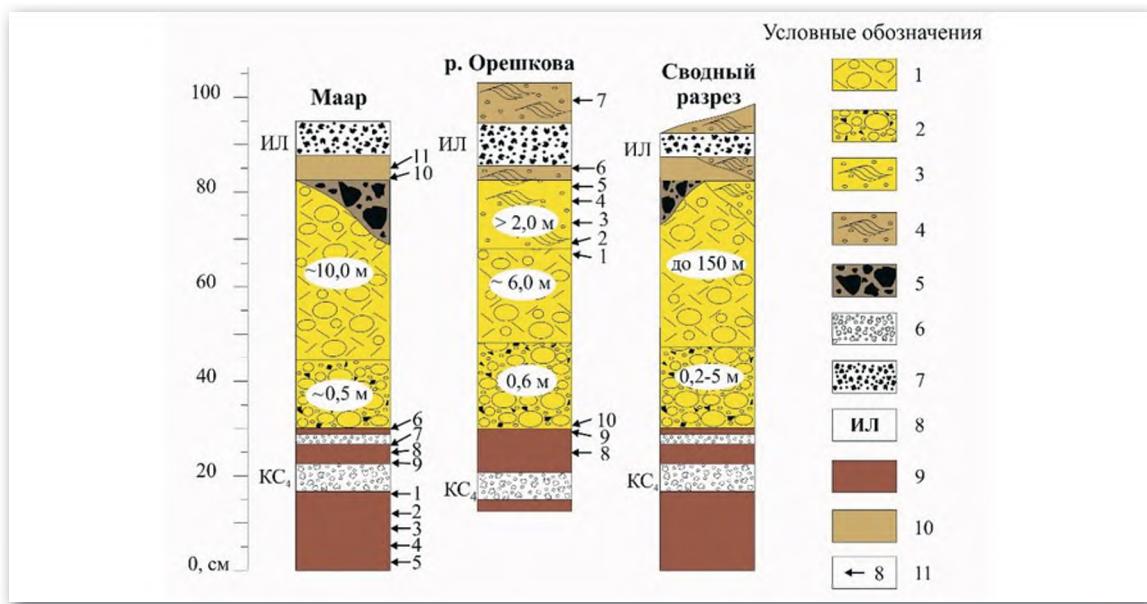


Рис. 1. Стратиграфия и опробование разрезов ППЧ на Южной Камчатке:

Условные обозначения: 1 — туфы КО; 2 — тефра КО; 3 — переотложенная пирокластика КО; 4 — гумусированная переотложенная пирокластика; 5 — отложения обвала; 6 — кислая тефра; 7 — базальтовая тефра; 8 — индекс тефры; 9 — погребенная почва; 10 — примитивная почва; 11 — места отбора образцов и их номера. Мощности пирокластики КО показаны вне масштаба

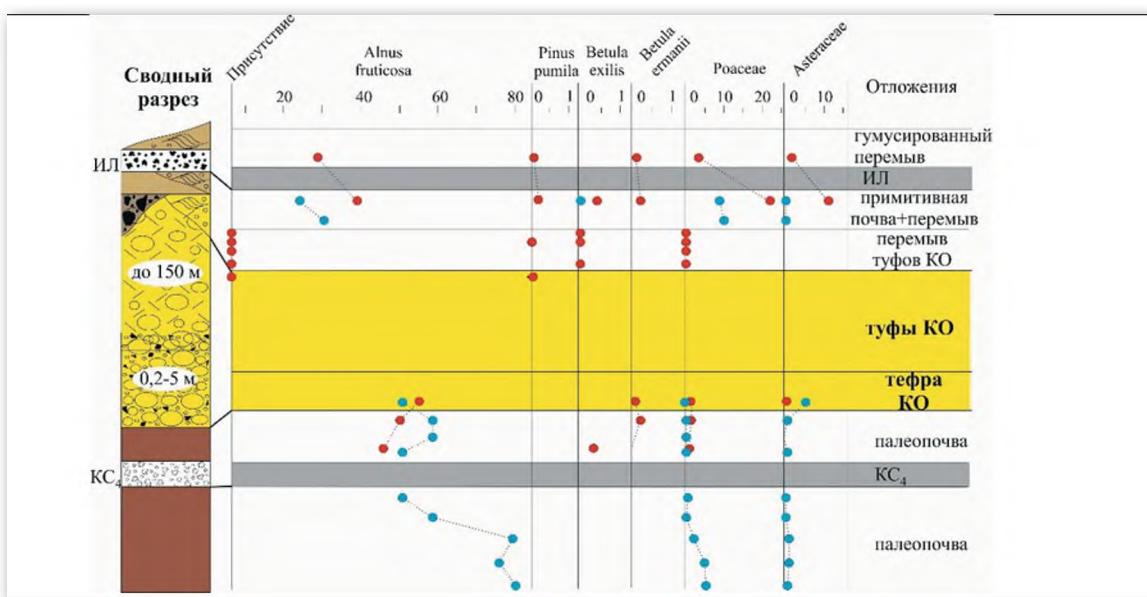


Рис. 2. Палинологические данные (избранные таксоны) разрезов ППЧ Южной Камчатки, сопоставленные по синхронным уровням.

Условные обозначения: процентные соотношения таксонов показаны красными точками для палеозаписи р. Орешкова и синими — для палеозаписи Маара; индексы тефры соответствуют: КС₄ — Ксудач 8800¹⁴С л. н.; КО — Курильское озеро 7600¹⁴С л. н.; ИЛ — Ильинский

Серии СПС из погребенной почвы до извержения КО характеризуют, преимущественно, климатогенные смены растительности в период вулканического покоя. В начале периода абсолютно преобладают ольховостланиковые сообщества в условиях мягкого океанического климата. Их постепенное сокращение, по-видимому, отражает переход к более контрастным условиям. Выпадение тефры КС₄ практически не повлияло на растительность, а близкий состав спектров в записях из разрезов на удалении друг от друга свидетельствует об однородности растительного покрова. Непосредственно перед извержением КО в долине р. Орешкова впервые появляется каменная береза.

Часть палеозаписей непосредственно над кровлей туфов КО из пачки переотложенной пирокластики характеризуется очень низкой пыльцевой концентрацией, что указывает на отсутствие сомкнутой растительности и нестабильность субстратов. Единичные находки пыльцы доминантов растительности, существовавшей здесь до извержения, позволяют заключить, что отдельные их популяции уцелели и выступили затем источниками восстановления сообществ.

Спектры, характеризующие начало почвообразования, отличаются мозаичностью и отсутствием общих трендов, что, возможно, отражает особенности восстановительных процессов различных местообитаний. Так, в долине р. Орешкова возобновляются ольховники, вновь появляется каменная береза и впервые — кедровый стланик. В районе Маара, ольховники заменяются луговыми сообществами.

СПС из тефры в обоих разрезах практически идентичны: они характеризуются высокой концентрацией таксонов и преобладанием среди них доминантов растительности, существовавшей до извержения. Наиболее обилен ольховник, период цветения которого наблюдается в мае — начале июня. Присутствует каменная береза, не характерная в целом для Южной Камчатки; период ее цветения наблюдается с начала до середины июня. Состав и соотношения таксонов в СПС позволяют предположить, что извержение КО произошло в начале сезона вегетации на Камчатке, скорее всего, в июне, когда цветут деревья и кустарники, в то время как массовое цветение травянистых растений еще не началось.

Работа выполнена в рамках темы НИР № FWME-2024-0011.

ЛИТЕРАТУРА

1. Payne R. J., Egan J. Using palaeoecological techniques to understand the impacts of past volcanic eruptions // *Quaternary International*. 2019. № 499. P. 278–289.
2. Mehringer P. J., Blinman E., Petersen K. L. Pollen influx and volcanic ash // *Science*. 1977. V. 198, № 4314. P. 257–261.
3. Дирксен В. Г., Дирксен О. В. Реконструкция восстановления растительности после катастрофического извержения Курильское озеро — Ильинская 7700 14C л. н. на Южной Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2004. № 3. С. 57–85.
4. Дирксен В. Г., Дирксен О. В. Использование пыльцевых данных для определения сезона и длительности извержений в прошлом // Вулканализм и связанные с ним процессы. Материалы XXVI ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 2023. С. 201–204.
5. Дирксен В. Г., Дирксен О. В., Назарова М. А. Применение палинологических данных для определения сезона извержения в прошлом на примере извержения вулкана Новарупта в 1912 году на Аляске, США // Вулканализм и связанные с ним процессы. Материалы XXVIII ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 2025. С. 354–357.
6. Ponomareva V. V., Melekestsev I. V., Kyle P. R., Rinkleff P. G., Dirksen O. V., Sulerzhitsky L. D., Zaretskaia N. E., Rourke R. The 7600 (¹⁴C) year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and field relationships // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2004. V. 136. P. 199–222.
7. Faegri K., Iversen J. *Textbook of pollen analysis* // The Blackburn Press, Caldwell, New Jersey, 1989, 328 p.

РАЗДЕЛ 3

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМО- И ГИДРОСФЕРЕ

3.1. Аномальные явления в атмосфере

АНОМАЛЬНАЯ ЖАРА В ИНДИИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА НАСЕЛЕНИЕ В СОВРЕМЕННОМ КЛИМАТЕ И В ВОЗМОЖНОМ БУДУЩЕМ

А. Ю. Дворников¹, канд. физ.-мат. наук,
А. К. Дубей², PhD, П. Лал^{2,3}, PhD,
П. Кумар², PhD, А. Кумар², PhD

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

²Департамент наук о Земле и окружающей среде,
Индийский институт естественнонаучного образования и исследований,
Бхопал, Индия

³Департамент геоинформатики, Центральный университет Джаркханда,
Ранчи, Индия

ABNORMAL HEAT IN INDIA AND ITS IMPACT ON THE POPULATION IN THE CURRENT CLIMATE AND IN THE POSSIBLE FUTURE

A. Y. Dvornikov¹, Ph.D.,
Aditya Kumar Dubey², Ph.D., Preet Lal^{2,3}, Ph.D.,
Pankaj Kumar², Ph.D., Amit Kumar², Ph.D.

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Department of Earth and Environmental Sciences,

Indian Institute of Science Education and Research Bhopal, India

³Department of Geoinformatics, Central University of Jharkhand, Ranchi, India

Рассматриваются опасности и риски для населения Индии, связанные с «волнами тепла» в современном и будущем климате. Использованы данные о социально-экономической уязвимости за летний сезон (апрель-июнь). Наблюдаемые случаи аномальной жары прогнозируются до конца века с помощью региональной модели Земли по сценарию RCP-8.5. Риск волн тепла значительно возрастет, особенно в восточной и центральной частях Индо-Гангской равнины и районе Малабар.

The study examines hazards and risks of «heat waves» for India's population under current and future climates, using socio-economic vulnerability data for the summer season (April-June). Observed cases of extreme heat are projected until the end of the century using a regional Earth system model under the RCP-8.5 scenario. The risk of heat waves will significantly increase, particularly in the eastern and central Indo-Gangetic Plain and the Malabar region.

Аномальная жара или волны тепла (ВТ) представляют собой одно из наиболее опасных климатических явлений, оказывающих значительное влияние на здоровье населения, экономику и экосистемы. В условиях глобального изменения климата частота и интенсивность ВТ увеличиваются, что особенно актуально для таких регионов, как Индия, где высокая плотность населения и социально-экономическая уязвимость делают население особенно восприимчивым к экстремальным температурам. Данные тезисы основаны на прежней работе, в которой исследуются риски, связанные с ВТ в Индии, как для современного климата, так и для возможного будущего, с использованием региональной модели системы Земли и данных о социально-экономической уязвимости населения [1]. Основное внимание уделяется оценке опасности, уязвимости и рисков, связанных с ВТ, в контексте сценария RCP-8.5 (Representative Concentration Pathways) [2], который предполагает достаточно резкое потепление.

Для анализа использовались данные о максимальной температуре воздуха за период с 1951 по 2019 гг., предоставленные Метеорологическим департаментом Индии [3]. Также были использованы демографические и социально-экономические данные переписи населения Индии 2011 г. и прогнозы численности населения на 2050, 2080 и 2100 гг. согласно сценарию SSP4 (Shared Socioeconomic Pathways 4) [4, 5]. Для моделирования будущих климатических условий применялась региональная модель системы Земли (ROM) [6] с использованием сценария изменения концентрации парниковых газов в атмосфере RCP-8.5. Опасность ВТ оценивалась на основе частоты их возникновения, а уязвимость населения рассчитывалась с использованием метода многокритериального анализа решений (multi-criteria decision analysis, MCDA). Риск определялся как функция опасности и уязвимости населения. Уязвимость рассматривалась как многомерное понятие, включающее физиологические, экономические, институциональные и социокультурные факторы.

Опасность волн тепла: в современном климате наиболее опасными регионами являются побережье Малабара, центральная Индия, Индо-Гангская равнина (IGP) и северо-западные округа. Модель ROM достаточно точно воспроизводит пространственное распределение опасности, хотя и с некоторыми отклонениями в северо-восточных регионах. В будущем, согласно сценарию RCP-8.5, опасность ВТ значительно возрастет, особенно в центральной и восточной частях IGP, а также в районе Малабар. К концу столетия ожидается увеличение частоты ВТ в 2–3 раза по сравнению с базовым периодом (1980–2005 гг.). Максимальный рост температуры прогнозируется в центрально-восточных и северных округах Индии, где уже наблюдаются экстремальные температуры.

Уязвимость населения: наиболее уязвимыми регионами являются северо-восточное побережье, IGP и крупные мегаполисы, такие как Мумбаи, Пуна, Калькутта и Бангалор. Уязвимость связана с высокой плотностью населения, низким уровнем дохода, неграмотностью и высокой долей сельскохозяйственных и уличных работников. В будущем уязвимость населения будет возрастать, особенно в регионах с высокой плотностью населения и низким уровнем адаптационных возможностей. Например, в IGP и Керале уязвимость будет увеличиваться до 2080 г., после чего стабилизируется в связи с прогнозируемым снижением темпов роста населения.

Риски для населения: риски, связанные с ВТ, наиболее высоки в юго-восточных прибрежных регионах, северо-западной Индии и IGP. В этих регионах уже наблюдается высокая смертность, связанная с аномальной жарой. В будущем риск будет увеличиваться, особенно в районах с высокой уязвимостью и опасностью. К концу столетия каждый регион Индии будет подвержен повышенному риску ВТ, что потребует разработки эффективных стратегий адаптации и смягчения последствий. Например, в Индо-Гангской равнине риск будет максимальным из-за сочетания высокой уязвимости и опасности.

Результаты исследования показывают, что в условиях изменения климата тепловые волны станут более частыми и интенсивными, что приведет к увеличению рисков для населения Индии. Особую озабоченность вызывает рост уязвимости в регионах с высокой плотностью населения и низким уровнем дохода, где адаптационные возможности ограничены. Для снижения этих рисков необходимы срочные меры по адаптации и смягчению последствий, включая улучшение инфраструктуры, повышение уровня образования и доходов населения, а также снижение выбросов парниковых газов. Одним из ключевых аспектов адаптации является повышение устойчивости населения к экстремальным температурам. Это может быть достигнуто за счет улучшения доступа к медицинским услугам, создания систем раннего предупреждения об аномальной жаре и разработки стратегий городского планирования, направленных на снижение эффекта «теплового острова». Кроме того, важно учитывать социально-экономические факторы, такие как уровень дохода, образование и занятость, которые играют важную роль в определении уязвимости населения.

Исследование демонстрирует, что в условиях изменения климата тепловые волны станут более частыми и интенсивными, что приведет к увеличению рисков для населения Индии. Для снижения этих рисков необходимы срочные меры по адаптации и смягчению последствий, включая улучшение социально-экономических условий и снижение выбросов парниковых газов.

Результаты исследования могут быть полезны для разработки национальных и региональных стратегий, направленных на снижение уязвимости населения к климатическим рискам [7].

Работа финансировалась совместно Российской научным фондом (RSF), проект № 19-47-02015, и Департаментом науки и технологий (DST) Правительства Индии (грант № DST/INT/RUS/RSF/P-33/G) в рамках проекта «Влияние изменений климата на экстремальные явления в Южной Азии: оценки на основе региональной климатической модели земной системы высокого разрешения». Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России (FMWE-2024-0028).

ЛИТЕРАТУРА

1. Dubey A., Lal P., Kumar P., Kumar A., Dvornikov A. Present and future projections of heatwave hazard-risk over India: A regional earth system model assessment // Environmental Research., 2021. 201. 111573. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111573>.
2. Riahi K., Rao S., Krey V., Cho C., Chirkov V., Fischer G., Kindermann G., Nakicenovic N., Rafaj P. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions // Climatic Change, 2011. 109. 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>.
3. Метеорологический департамент Индии. Данные о максимальной температуре воздуха <https://www.imdpune.gov.in/lrfindex.php>.
4. The Gridded Population of the World (GPW) collection. Набор данных о будущем населении <https://www.earthdata.nasa.gov/data/projects/gpw>.
5. Riahi K. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview // Global Environ. Change, 2017. 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
6. Sein D. V. et al. Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model ROM: 1. Description and validation // J. Adv. Model. Earth Syst., 2015. V. 7. P. 268–304. <https://doi.org/10.1002/2014MS000357>.
7. Резолюция Организации Объединенных Наций (2017), принятая Генеральной Ассамблеей 6 июля 2017 года, Работа Статистической комиссии, связанная с Повесткой дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. <https://docs.un.org/ru/A/RES/71/313>.

БЛОКИРУЮЩИЕ АНТИЦИКЛОНЫ В АТЛАНТИКО-ЕВРАЗИЙСКОМ РЕГИОНЕ В ПЕРИОД 1980–2024 ГГ.

E. A. Безотеческая^{1,2}

¹Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

BLOCKING ANCYCLOCNES IN THE ATLANTIC-EURASIAN REGION DURING THE PERIOD 1980–2024

E. A. Bezotecheskaya^{1,2}

¹Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

²Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

На основе данных реанализа получено пространственное распределение, и оценена продолжительность блокирующих антициклонов в атлантико-евразийском регионе в период 1980–2024 гг. Наибольшая повторяемость блокингов (продолжительностью не менее 10 дней) отмечается над Скандинавским п-овом и Великобританией, с сезонными вариациями их локализации. В среднем наблюдается 3–4 события атмосферного блокирования в год продолжительностью 11–14 дней. В рассматриваемый период, характеризующийся глобальным потеплением, значимых изменений характеристик блокирующих антициклонов выявлено не было.

Using reanalysis data, the spatial distribution and duration of blocking anticyclones in the Atlantic-Eurasian region during 1980–2024 were examined. The highest frequency of blocking events (lasting at least 10 days) was observed over Scandinavian Peninsula and Great Britain, with seasonal variations in their locations. On average, 3–4 atmospheric blocking events occur annually, persisting for 11–14 days. During the study period, which was characterized by global warming, no significant changes in the characteristics of blocking anticyclones were detected.

Блокирующие антициклоны (блокинги) представляют собой малоподвижные, долгоживущие и высокие барические образования, которые могут вызывать значительные приземные погодные аномалии, иногда приводящие к катастрофическим последствиям [1–3]. Их формирование происходит в тропосфере средних широт и ведет к нарушению западно-восточного переноса воздушных масс. Выделяют три основные типа блокирования: расщепляющийся, омега-блокирование и меридиональный [3].

Для обнаружения эпизодов атмосферного блокирования использовались поля геопотенциальной высоты на уровне изобарической поверхности 500 гПа реанализа NCEP/NCAR с широтно-долготным разрешением $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ и суточным временным шагом за период 1980–2024 гг. [4]. Регион исследования — атлантико-евразийский сектор ограничивался координатами 60° з. д. — 90° в. д. и 45 – 75° с. ш. Выделение географических областей блокирования, дат установления и распада, а также продолжительности каждого эпизода определялись с применением метода и критериев, предложенных в [5]. Двумерный индекс, основанный на обращении меридионального градиента геопотенциальной высоты на уровне поверхности 500 гПа [6, 7], рассчитывался на каждом шаге по времени для определения мгновенного (instantaneous) блокирования по формулам:

$$GHGS(\lambda_0, \phi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \phi_0) - Z_{500}(\lambda_0, \phi_S)}{\phi_0 - \phi_S}, \quad GHGN(\lambda_0, \phi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \phi_N) - Z_{500}(\lambda_0, \phi_0)}{\phi_N - \phi_0}, \quad (1)$$

где λ_0 и ϕ_0 координаты (долготы и широты соответственно) узлов сетки рассматриваемого региона; $\phi_S = \phi_0 - 15^\circ$, $\phi_N = \phi_0 + 15^\circ$. Для каждого узла (λ_0, ϕ_0) мгновенное блокирование определялось, если одновременно выполнялись два условия:

$$GHGS(\lambda_0, \phi_0) > 0 \text{ и } GHGN(\lambda_0, \phi_0) < -10 \text{ м/гр. широты.} \quad (2)$$

Для выделения крупномасштабных эпизодов применялось условие, при котором критерий мгновенного блокирования соблюдался непрерывно в каждом узле сетки как минимум на протяжении 15° по долготе. В конечном итоге узел сетки, удовлетворяющий крупномасштабному критерию, относился к эпизоду блокирования, если сохранялся в центре полигона с размерами 5° широты $\times 10^\circ$ долготы не менее 10 дней. Датой установления блокинга считалось появление первых критериев, удовлетворяющих всем условиям, распадом — полное исчезновение. Продолжительность блокинга определялась по максимальному числу дней.

На рис. 1 представлено пространственное распределение эпизодов атмосферного блокирования в атлантико-евразийском регионе за период 1980–2024 гг. Наиболее часто (до 16% случаев) блокинги обнаруживаются в районе Скандинавского п-ова и Великобритании. С меньшей повторяемостью (до 12%) блокинги встречаются в районе восточного побережья Гренландии. Над севером европейской части России (ЕЧР) и юго-западной акваторией Карского моря повторяемость не превышает 10%.

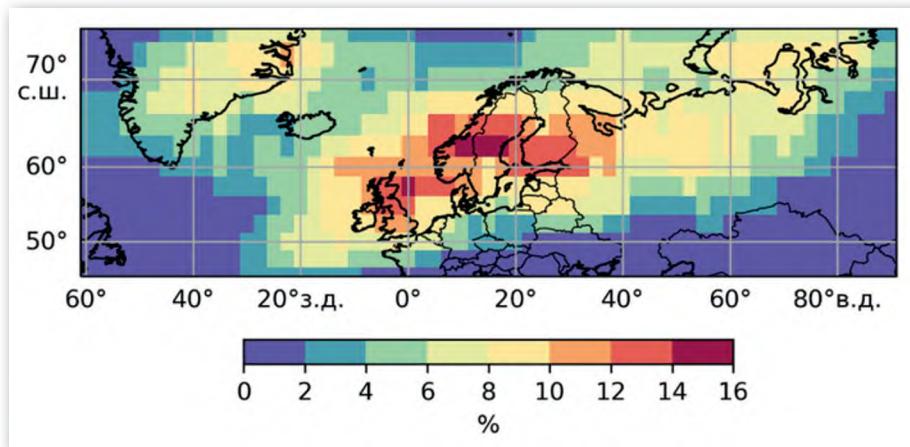


Рис. 1. Пространственное распределение эпизодов атмосферного блокирования в атлантико-евразийском регионе в период 1980–2024 гг.

Известно, что блокинги являются нерегулярными и сложно прогнозируемыми событиями [8]. В среднем в атлантико-евразийском регионе отмечается 3–4 блокинга в год, при этом в отдельные годы, например, в 1998, 2002 и 2009 гг. с применением указанных критериев не было зафиксировано ни одного эпизода (рис. 2). За анализируемый период статистически значимой тенденции к увеличению или уменьшению числа блокингов выявлено не было.

При рассмотрении особенностей распределения блокингов по сезонам года выделяются значительные различия. Зимой наибольшая повторяемость эпизодов (до 28%) сохраняется в районе южной части Скандинавского п-ова и Великобритании (рис. 3а).

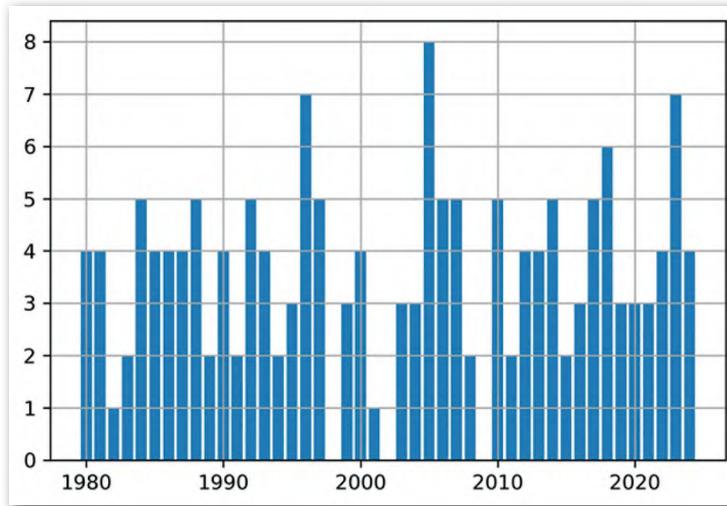


Рис. 2. Суммарное число блокингов в атлантико-евразийском регионе за каждый год в период 1980–2024 гг.

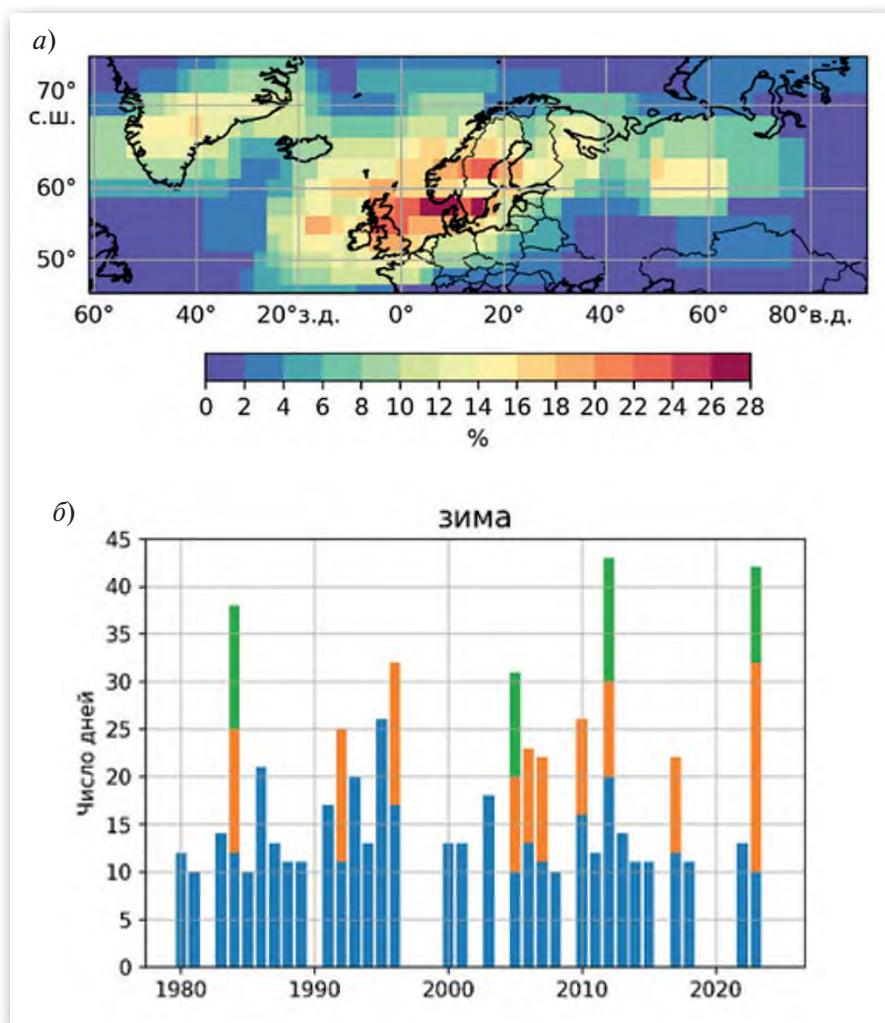


Рис. 3. Пространственное распределение зимних блокингов в атлантико-евразийском регионе (а); количество и продолжительность зимних эпизодов блокирования (б) в период 1980–2024 гг.

Средняя продолжительность зимних блокингов составляет 13 дней, с максимальным значением (26 дней), зафиксированным в 1995 г. (рис. 3б).

Пространственное распределение блокингов весной близко к зимнему: максимальные значения повторяемости наблюдаются в районе Великобритании и Скандинавского п-ова. Летом область наибольшей повторяемости эпизодов блокирующих антициклонов смещается в район юго-западной акватории Карского моря. Второй максимум проявляется над восточной частью Скандинавского п-ова и северо-западом ЕЧР. Осенью наибольшая частота блокингов идентифицируется над акваторией Гренландского моря, а также западной частью Скандинавского п-ова. Средняя продолжительность эпизодов в указанные сезоны варьируется от 12 до 14 дней.

Анализ количества и средней продолжительности эпизодов блокирований по пятилетиям не выявил статистически значимых трендов ни в одном из сезонов года.

Исследование выполнено за счет средств Российской Научного Фонда, проект № 23-17-00273.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мохов И. И.* Особенности формирования летней жары 2010 г. на Европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 709–716.
2. *Yiou P., Cattiaux J., Faranda D. et al.* Analyses of the Northern European Summer Heatwave of 2018 // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2020. V. 101. № 1. P. S35–S40.
3. *Kautz L.-A., Martius O., Pfahl S. et al.* Atmospheric blocking and weather extremes over the Euro-Atlantic sector — a review // Weather Clim. Dynam. 2022. V. 3. P. 305–336.
4. *Kalnay et al.* The NCEP/NCAR40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. № 3. P. 437–472.
5. *Davini P., Cagnazzo C., Gualdi S., Navarra A.* Bidimensional diagnostics, variability and trends of Northern Hemisphere blocking // Journal of Climate. 2012. V. 25. № 19. P. 6496–6509.
6. *Tibaldi S., Molteni F.* On the operational predictability of blocking // Tellus. 1990. № 42A. P. 343–365.
7. *Scherrer S., Croci-Maspoli M., Schwierz C., Appenzeller C.* Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region // International Journal of Climatology. 2006. № 26. P. 233–249.
8. *Шакина Н. П., Иванова А. Р.* Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирование // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 5–18.

НОВОЗЕМЕЛЬСКАЯ БОРА, ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА И КЛАССИФИКАЦИИ

К. С. Воскресенский¹,
Д. В. Драбенко¹, канд. техн. наук, Е. Ю. Орлова¹
¹ФГБУ «ААНИИ», Санкт-Петербург, Россия

NOVOZEMELSKAYA BORA, PROBLEMS OF FORECAST AND CLASSIFICATION

K. S. Voskresensky¹,
D. V. Drabenko¹, PhD, E. Yu. Orlova¹
¹FSI AARI, Saint-Petersburg, Russia

Рассмотрен вопрос единства факторов возникновения и протекания нескольких явлений единого генеза, определяемых в нормативных документах как «местные ветры»: Новоземельская бора, Новороссийский норд-ост, Певекский южак. Показана проблема классификации этого разрушительного явления погоды с точки зрения нормативно-правового регулирования в Российской Федерации и в целом в практике ВМО. Внесено предложение объединить эти явления в одну общую группу опасных явлений для упрощения классификации и разработки прогнозических методов.

The article discusses the unity of the factors that cause and characterize several phenomena currently defined as «local winds»: the Novaya Zemlya Bora, the Novorossiysk North-East, and the Pevek South-West. The article highlights the challenges in classifying these destructive weather phenomena from a regulatory and legal perspective in the Russian Federation and within the framework of WMO practices. The article proposes a unified classification system for these phenomena to simplify their classification and facilitate the development of predictive methods.

Территория Российской Федерации характеризуется большим разнообразием физико-географических условий. В административных границах одного государства единовременно могут наблюдаться совершенно противоположные по своей природе аномалии погоды: засуха и наводнение, лесной пожар и обледенение. С таким разнообразием наблюдаемых явлений для специалистов Росгидромета вопрос разработки единой классификации и построения единых прогнозических методик для процессов общего генеза встаёт особенно остро.

Одним из таких процессов является стоковый ветер с прибрежных гор, образующийся преимущественно при прохождении циклонов по определённым траекториям, известный в разных районах под разными названиями, например: Новоземельская бора, Певекский южак, Новороссийский норд-ост, Сарма, Харахаиха, боры Адриатического моря. Это опасное явление погоды относительно хорошо изучено именно в своих местных вариациях, их изучению посвящено немалое количество исследований и публикаций как в России, так и за рубежом (например, [1–3]). Ежегодно что Певекский южак, что Новороссийский норд-ост наносят ощутимый ущерб хозяйственной деятельности прибрежных городов, в честь которых они и получили свои названия.

В рядах научного сообщества ведётся дискуссия об общем названии для данного класса явлений, кто-то называет их «стоковым ветром», кто-то относит к «катабатическим ветрам», существуют предложения называть «подветренными бурями». Однако, в действующих руководящих документах Росгидромета и ВМО по опасным явлениям погоды пока нет упоминания ни одного из вышеперечисленных названий. Для удобства чита-

теля и сохранения нейтральной позиции в дискуссии в рамках настоящей статьи будем называть подобный ветер борой. Согласно определению ВМО, утверждённому Росгидрометом, бора — холодный порывистый местный ветер, возникающий в случае, когда поток холодного воздуха преодолевает на своём пути возвышенность. Данное явление до сих пор ни в отечественной, ни в зарубежной практике не отнесено к опасным явлениям погоды. Согласно существующей и действующей номенклатуре определения опасных явлений, только три из них зависят от скорости ветра [4, 5]:

1. Очень сильный ветер — средняя скорость ветра не менее 20 м/с или максимальная скорость ветра (порыв) не менее 25 м/с (на побережье морей и в горных районах не менее 30 м/с);

2. Ураганный ветер (ураган) — максимальная скорость ветра (порыв) 33 м/с и более;

3. Шквал — резкое кратковременное (в течение нескольких минут, но не менее 1 мин) усиление ветра до 25 м/с и более.

Те же самые критерии можно найти и в других нормативно-правовых актах Российской Федерации, Росгидромета, и Всемирной метеорологической организации (РД 52.27.724–2019, РД 52.04.275–89, РД 52.33.877–2019, РД 52.27.339–93 и т. д.). На текущий момент опасным явление погоды, связанное с ветровым воздействием на побережье, считается только по достижении скорости ветра, способной «срывать черепицу с крыш» [6]. При этом не учитывается продолжительность явления, оказываемый эффект на близлежащую акваторию (например, вынос айсбергов на траектории Северного Морского Пути – СМП; повреждение пришвартованных плавсредств; потеря визуальных ориентиров у судов малого водоизмещения, находящихся в момент явления на акватории) и социально-экономические аспекты жизни населённых пунктов, находящихся в зоне воздействия.

Для демонстрации влияния боры на социально-экономические аспекты, была проведена оценка интенсивности и продолжительности явления в трёх районах Российской Федерации. Использовались данные стандартных восьмисрочных наблюдений, зафиксированные на двух автоматических метеорологических станциях (далее — АМС) на архипелаге Новая Земля в районах мыса Опасный и мыса Ледяная Гавань (рис. 1), и на двух гидрометеорологических станциях (далее — ГМС) регулярной сети Росгидромета — Певек и Новороссийск (находятся непосредственно в административных границах одноимённых населённых пунктов). Продолжительность рядов наблюдений на станциях и общее число рассмотренных сроков наблюдений приведены в табл. 1.



Рис. 1. Точки постановки АМС на арх. Новая Земля

Таблица 1

Продолжительность рядов наблюдений на станциях

Название станции	Период наблюдений	Общее число сроков наблюдений
м. Опасный	09.08.2012–30.09.2017	5069
м. Ледяная гавань	13.08.2012–21.06.2017	5738
Певек	01.02.2005–20.05.2025	51245
Новороссийск	07.11.2005–19.05.2025	42663

Градации скоростей для оценки ветровых ситуаций, в зависимости от их скорости, подбирались, исходя из имеющихся рядов наблюдений и максимально близко к Шкале Бофорта [7]. Вторым критерием определения боры, как мезомасштабного атмосферного процесса, является направление этого ветра, «стекающего» с гор. Направление ветра для включения периода усиления ветра в выборку: север, северо-восток — м. Опасный; северо-запад, север — м. Ледяная Гавань; юго-восток — Певек; северо-восток — Новороссийск.

Градации скоростей ветра для расчётов:

- 1 случай: $\Delta U \geq 4 \text{ м/с}$, $U_{CP} \geq 14 \text{ м/с}$ — крепкий ветер;
- 2 случай: $\Delta U \geq 4 \text{ м/с}$, $U_{CP} \geq 17 \text{ м/с}$ — очень крепкий ветер;
- 3 случай: $\Delta U \geq 4 \text{ м/с}$, $U_{CP} \geq 20 \text{ м/с}$ — шторм.

где U_{CP} — скорость ветра в срок, ΔU — разница скоростей ветра между сроками.

Результаты оценки боры на рассматриваемых станциях приведены в табл. 2 (цифры от 1 до 3 — градации скоростей ветра). Продолжительность конкретного случая наблюдения боры определялась как количество сроков, в которых выполнялись одновременно два условия: скорость ветра выше или равна пороговой (U_{cp}) и разница в скорости ветра между сроками выше или равна пороговой (ΔU). Полученное число сроков умножалось на 3ч (разницу в часах между сроками). В случае значительных пропусков между сроками (более 12 ч — 3 сроков) явления считались как два разных случая. Ввиду статистически значимой разницы между станциями по продолжительности наблюдений, продолжительность боры была вычислена в процентном отношении между общей продолжительностью всех случаев боры к общему времени наблюдений в часах и также представлена в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки боры

Пункт	Число случаев общее, шт			Средняя продолжительность, ч			Средняя из максимальных скоростей ветра, м/с	Продолжительность боры, %
	1	2	3	1	2	3		
м. Опасный	32	18	22	18	18	158	17,3	3,65%
м. Ледяная Гавань	67	32	1*	18	18	36	17,4	5,23%
Певек	114	117	70	18	21	24	20,6	2,80%
Новороссийск	114	27	10	29	46	58	18,9	4,93%

* штормовой ветер северо-западного направления (т. е. стоковый для данной точки наблюдения), наблюдался всего 1 раз в 6:00 15 октября 2012 г. Был зафиксирован всего 1 срок, затем данных о скорости ветра от станции некоторое время не поступало. В рассматриваемый период датчик температуры и влажности воздуха был неисправен (не передавал информации). Предполагаем, что если бы не технические неполадки, то данных о штормовом ветре от станции было бы больше.

Как уже было рассмотрено выше, понятие «бора» официально не относится к опасным явлениям погоды и не имеет общего структурного подхода к его прогнозу (т. к. нет

даже единого определения, закреплённого в нормативно-правовых актах, есть лишь «местные ветры»). Из представленных материалов видно, что описываемое явление имеет ощутимую для ведения хозяйственной деятельности повторяемость — в среднем 15 дней за год (для сравнения — в 2025 г. 118 выходных и праздничных дней); интенсивность — при ветре более 14 м/с уже останавливается большая часть морских операций; и способно быть источником чрезвычайных ситуаций.

По мнению авторов необходимо расширить и доработать перечень опасных явлений, включив в него не только критерии по скорости ветра, но и по продолжительности негативного воздействия. Альтернативным решением может стать выделение боры в качестве самостоятельного опасного явления погоды. Соответствующее предложение было внесено в Решение Конференции [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мельник С. С., Кулясова О. А.* Местные ветры территории Российской Федерации // Стратегические ресурсы Тюменского АПК: Люди, наука, технологии: Сборник трудов LVIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 12 марта 2024 года. Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2024. С. 16–21.
2. *Шестакова А. А.* Новоземельская бора: подветренные характеристики и структура натекающего потока // Арктика и Антарктика. 2016. № 2. С. 86–98.
3. *Дмитриев А. А.* Певекский южак и борьба с ним / 2024. ISBN978-5-0062-7550-8.
4. РД 52.04.563–2013. Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями. Введ. 2014-07-01. М.: Росгидромет, 2013. 23 с.
5. РД 52.04.563–2002. Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения. Введ. 2003-01-01. М.: Росгидромет, 2002. 14 с.
6. Росгидромет, Шкала Бофорта // MeteoInfo.ru: [сайт]. URL: <https://meteoinfo.ru/bofort> (дата обращения: 27.08.2025).
7. РД 52.04.275-89. Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок. Введ. 1990-01-01. М.: Госкомгидромет, 1989. 18 с.
8. Решение Всероссийской конференции «Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита» (ПрОК-25). СПб., 2025. URL: <https://spb.ocean.ru/wp-content/uploads/2025/07/PrOK-2025-Reshenie.pdf> (дата обращения: 27.08.2025).

**ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ
ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНОГО ГРОЗОВОГО ОБЛАКА
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
(1 июля 2023 года)**

М. Л. Торопова¹,
А. А. Синьевич¹, д-р. техн. наук, Г. Д. Федотова¹

¹Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Войкова,
Санкт-Петербург, Россия

**DYNAMICS OF THE SPATIAL STRUCTURE
OF THE MAIN PARAMETERS OF A POWERFUL THUNDERCLOUD
BASED ON THE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION
(JULY 1, 2023)**

M. L. Toropova¹,
A. A. Sin'kevich¹, Dr. Sc., G. D. Fedotova¹

¹Voeikov Main Geophysical Observatory,
St. Petersburg, Russia

В статье приведены результаты исследования структуры и динамики мощного грозо-градового облака в ходе эксперимента, выполненного при помощи трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака. Выполненные расчеты показали изменения величины и положения экстремумов основных параметров — максимальных значений скорости восходящего потока, водности и ледности микрофизических фракций и проч.— в зависимости от стадии жизни облака и стадии его электризации. Рассмотрены особенности пространственного положения электрических характеристик облака.

The article presents the results of the study of the structure and dynamics of a powerful thundercloud with hail achieved via experiment performed using a three-dimensional non-stationary numerical model of a convective cloud. The simulation showed changes in the magnitude and position of the extremes of the main parameters — maximum values of updraft velocity, water and ice content of microphysical fractions, etc.— depending on the life stage of the cloud and its electrification. The features of the spatial position of the cloud electrical characteristics are considered.

Вопросы развития конвективных облаков в целом и их электризации в частности остаются актуальными и до конца не решенными [1–4]. Моделирование конвективных облаков является одним из немногих способов получения информации об изменениях характеристик при электризации — с достаточно малым пространственным и времененным шагом. Для выполнения численных экспериментов был выбран день, когда наблюдалось развитие мощных грозовых облаков, дающих интенсивные осадки в Санкт-Петербурге и Ленинградской области — 01 июля 2023 г. При расчетах использовалась трехмерная нестационарная численная модель конвективного облака, разработанная некоторыми НИУ Росгидромета под руководством ФГБУ «ГГО» [5]. Модель учитывает процессы электризации облака, имеет пространственный шаг 100 м по вертикали и 200 м по горизонтали (в представленном расчете), в качестве начальных данных использует распределение по высоте давления, температуры и влажности в атмосфере. Результаты расчетов контролировались по данным радиолокационных наблюдений (ДМРЛ-С в пос. Войково, Лен. область) и данным радиозондирования атмосферы (выполненных на аэрологической станции Войково).

Облако возникло в расчетной области на 23 мин, в дальнейшем анализе этот момент принят за точку отсчета (0 мин). При анализе развития мощного конвективного облака, сопровождавшегося опасными явлениями погоды, представляет интерес как абсолютная величина экстремумов основных характеристик облака, так и время достижения этих величин (в т. ч. относительно других величин) и общий характер их эволюции.

В рассматриваемом расчете высота верхней границы облака достигала максимального значения 11,6 км на 36 мин развития облака. Результаты достаточно близки к расчетному значению высоту верхней границы конвективной облачности по данным радиозондирования (высоте уровня равновесной температуры), составившей 10,7 км. По данным радиолокационных наблюдений, верхняя граница наиболее мощных грозовых облаков в рассматриваемый день достигала 11,5 км. Такое соответствие результатов экспериментов данным наблюдений говорит о том, что выбранный для исследования процесс был наиболее мощным в имеющихся атмосферных условиях.

Временной ход высоты верхней границы (H_{TOP}) и прочих основных параметров развития облака приведен на рис. 1. Показано, что максимуму H_{TOP} предшествует максимум радиолокационной отражаемости (Z_{MAX} , 19 мин), ледности градин и крупы (Q_I , 20 мин), интенсивности осадков — как суммарных, так и града (23 мин), водности дождевых капель (Q_R , 23 мин), скорости восходящего потока (W , 26 мин).

Облако переходит в грозовую стадию на 18 мин. В это время H_{TOP} составляет 7,5 км, W — 18 м/с, Z_{MAX} — 58 dBZ, а осадки из облака еще не выпадают.

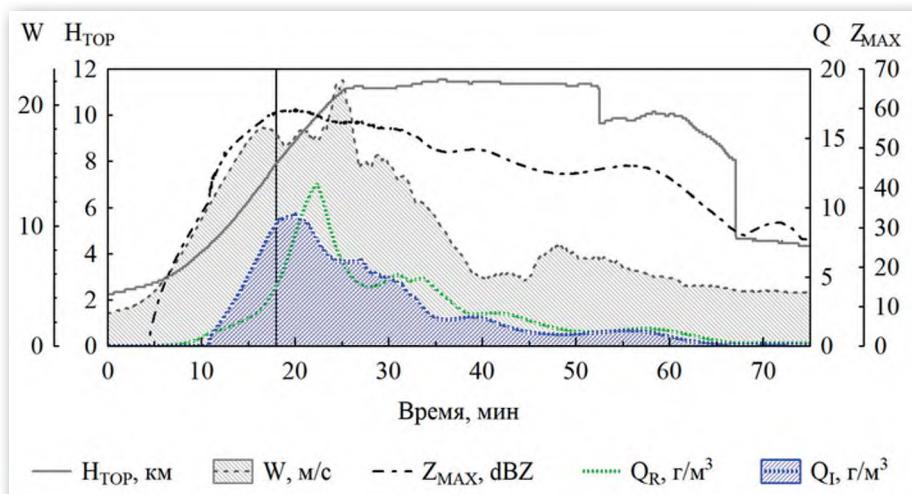


Рис. 1. Временной ход параметров облака (максимальных по расчетной области значений):

высоты верхней границы (H_{TOP}), скорости восходящего потока (W),
максимальной радиолокационной отражаемости (Z_{MAX}),
водности дождевых капель (Q_R), ледности градин и крупы (Q_I)

Конвективные облака, в отличие от слоистообразных, имеют вертикальные и горизонтальные размеры, сопоставимые по масштабу. При рассмотрении их характеристик зачастую упор делается именно на вертикальное распределение параметров в облаке. При этом особое внимание уделяется водности (ледности) микрофизических фракций, восходящим (нисходящим) потокам, объемной плотности заряда, напряженности электрического поля — исходя из представлений о том, как происходит электризация облака. Считается, что ведущую роль в электризации играют крупные ледяные и снежные частицы: крупа и град [4]. Так, анализ результатов моделирования показал,

что на начальном этапе развития облака и период первых электрических разрядов максимальное содержание микрофизических фракций зафиксировано в зоне восходящего потока, как и наибольшие значения объемной плотности заряда (τ) и напряженности электрического поля (E). В ходе дальнейшего развития облака частицы осадков выпадают из облака. Наибольшие значения электрических параметров в этот период, предположительно, связаны с частицами осадков и с ледяными кристаллами в верхней части облака.

При рассмотрении пространственной структуры также представляет интерес горизонтальное распределение характеристик в облаке на определенных уровнях. Такими характерными уровнями могут быть: уровень максимального значения объемной плотности заряда, максимальной напряженности электрического поля, максимальных значений восходящей скорости, ледности градин и т. д. и т. п., а кроме того — уровень изотермы $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и некоторые другие. Горизонтальные сечения облака в момент начала разрядов на высоте изотермы $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены на рис. 2.

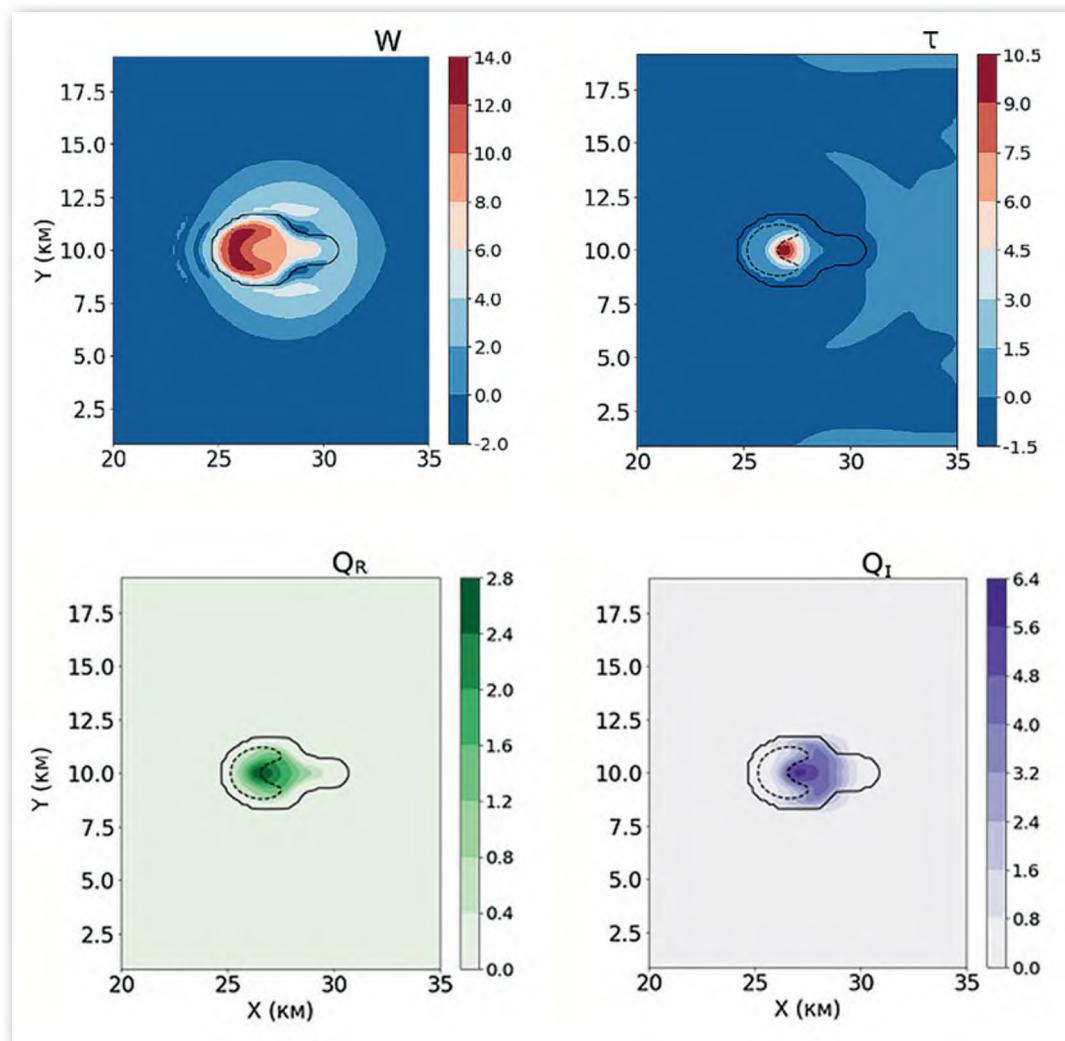


Рис. 2. Горизонтальные сечения облака в момент начала разрядов (18 мин) на высоте изотермы $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:
скорость восходящего потока (W , м/с), объемная плотность заряда (τ , 10^{-9} Кл/м^3),
водность дождевых капель (Q_R , г/м^3), ледность градин и крупы (Q_I , г/м^3).
Сплошной черной линией показаны границы облака, пунктирной — область, где $W \geq 10 \text{ м/с}$

Именно вблизи изотермы 0 °С наблюдались максимальные значения τ при начале грозовой активности. Показано, что наибольшие значения τ находятся в зоне умеренных скоростей восходящего потока, в центральной части облака. Область наибольших значений τ совпадает по положению с зонами наибольшего удельного содержания частиц осадков: дождевых капель, градин и крупы.

Исследование распределений пространственных характеристик грозового облака (по результатам численного моделирования) показало, что есть связь между расположением наибольшего удельного содержания частиц осадков, в первую очередь — градин и крупы, и наибольшими значениями объемной плотности заряда. Дальнейшие исследования распределения этих характеристик позволят получить новые сведения об электризации конвективных облаков.

Авторы благодарят руководство и сотрудников Главного вычислительного центра Росгидромета за предоставление вычислительного ресурса, с помощью которого были выполнены расчеты с использованием трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 25-27-00219).

ЛИТЕРАТУРА

1. Stolzenburg M. Marshall Charge Structure and Dynamics in Thunderstorms // Space Sc. Rev. 2008. V. 137. P. 355–372. doi: 10.1007/978-0-387-87664-1_23.
2. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Кулиев Д.Д и др. Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития // Известия Вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 900–907.
3. Дементьева С.О., Мареев Е.А. О вкладе турбулентности в электризацию грозовых облаков // Известия РАН. ФАО. 2018. Т. 54, № 1. С. 28–35. doi: 10.7868/S0003351518010038.
4. Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Синькевич А.А. и др. Физико-статистическая эмпирическая модель развития молниевой активности конвективных облаков // Труды ГГО. 2019. Вып. 595. С. 83–106.
5. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Затевахин М.А., Игнатьев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. 2016. Вып. 582. С. 45–91.

3.2. Катастрофические природные и антропогенные явления в океане

ЦУНАМИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ: ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР И АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

И. П. Медведев¹, канд. физ.-мат. наук, Е. С. Цуканова¹,
Д. С. Выдрин¹, А. Ю. Медведева¹, Д. И. Пилик¹

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

TSUNAMIS IN THE SEA OF JAPAN: A HISTORICAL REVIEW AND CURRENT ISSUES

I. P. Medvedev¹, Ph.D., E. S. Tsukanova¹,
D. S. Vydrin¹, A. Yu. Medvedeva¹, D. I. Pilik¹

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Японское море — одна из самых сейсмоактивных акваторий, омывающих побережье Российской Федерации. В текущем исследовании рассмотрены важнейшие цунамигенные землетрясения, которые произошли в Японском море в XX–XXI вв. и проявились на побережье РФ: 1940 (M_w 7,5), 1964 (M_w 7,5–7,7), 1971 (M_w 7,3), 1983 (M_w 7,7–7,8), 1993 (M_w 7,7) и 2007 (M_w 6,2). Отдельное внимание в исследовании уделено цунами 2022 г., связанному с извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай в центральной части Тихого океана, и цунами 1 января 2024 г., вызванного сильным землетрясением в районе полуострова Ното.

The Sea of Japan is one of the most seismically active basins bordering the coast of the Russian Federation. This study examines the most important tsunamigenic events that occurred in the Sea of Japan in the XX–XXI centuries and were observed on the coast of the Russian Federation: 1940 (M_w 7,5), 1964 (M_w 7,5–7,7), 1971 (M_w 7,3), 1983 (M_w 7,7–7,8), 1993 (M_w 7,7), and 2007 (M_w 6,2). Special attention is given to the 2022 tsunami associated with the eruption of the Hunga-Tonga Hunga-Ha'apai volcano in the central Pacific Ocean and the tsunami of January 1, 2024, caused by a strong earthquake in the Noto Peninsula area.

Японское море — одна из самых сейсмоактивных акваторий, омывающих побережье Российской Федерации. В этом регионе в течение XX–XXI вв. неоднократно происходили сильные землетрясения, которые генерировали цунами. Основная угроза для побережья Японского моря связана с сильными цунами, вызванными региональными землетрясениями, происходящими в акватории моря (рис. 1). За последние 100 лет в Японском море произошло пять сильных землетрясений: в 1940 (M_w 7,5), 1964 (M_w 7,5–7,7), 1983 (M_w 7,7–7,8), 1993 (M_w 7,7) и 2024 (M_w 7,5) гг. [1]. Для побережья Татарского пролива значимые цунами были вызваны локальными землетрясениями, очаги которых располагались непосредственно в проливе: 1971 (M_w 7,3) и 2007 (M_w 6,2) гг. Дополнительную опасность представляют трансокеанские цунами, сгенерированные в субдукционных областях Тихого океана и проникающие в Японское море через проливы. Однако при распространении через проливы эти трансокеанские цунами существенно ослабевают и на побережье Японского моря имеют высоты не более метра.

15 января 2022 г. в юго-западной части Тихого океана произошло извержение подводного вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, вызвавшее сильные волны цунами с двойным механизмом генерации: «прямые океанские» (вызванные подводным взрывом) и «атмосферные» (вызванные атмосферными волнами Лэмба) [2]. Волны цунами распространялись по океану и были отчетливо зарегистрированы в окраинных морях северо-западной части Тихого океана [3], включая Японское море [4]. Два различных типа приходящих волн оказывали на море разнообразное воздействие, определяемое происхождением волн, особенностями их распространения и локальными топографическими свойствами. Результаты работ [3, 4] показывают, что на побережье Японского моря реализовались оба механизма возбуждения волн цунами, т. е. наблюдались как волны, пришедшие «извне», так и волны, сформировавшиеся непосредственно в акватории в результате прямого атмосферного воздействия на поверхность моря. Максимальные волны цунами наблюдались на станциях Преображене (34 см), Мукхо (34 см) и Рудная Пристань (44 см).

1 января 2024 г. в Японском море в районе полуострова Ното на западном побережье острова Хонсю произошло землетрясение магнитудой M_w 7,5. Землетрясение вызвало сильнейшее с 1993 г. цунами с высотой волн до семи метров, которое распространялось по всей акватории Японского моря и достигло побережья России. В [5–7] были исследованы распространение и трансформация волн цунами как в акватории всего Японского моря, так и в отдельных бухтах и заливах. В [5] были проанализированы колебания уровня моря на 37 метеографах в Японии, России и Корее после цунами 1 января 2024 г. Было проведено численное моделирование цунами с использованием трех различных моделей источника. Результаты моделирования сравнивались с наблюдениями метеографов. Самая большая продолжительность цунами составила 51 час на станции Хамада в южной части моря. На северо-западе Хонсю и юге Хоккайдо высота волн над приливным уровнем моря достигла 34 см в Фукауре. В Приморье волны достигли 34 см в Преображении. Особенности донного рельефа, в частности, подводная возвышенность Ямато, играли роль естественного барьера, защищающего побережье Приморья от волн и уменьшающего их величину [5].

Результаты анализа [5] показывают, что, за исключением ближней зоны, самая высокая волна была зафиксирована на побережье Южной Кореи и составила 82 см в Мукхо. В [6] на основе данных с острова Уллындо были восстановлены спектры экстремальных колебаний уровня на Корейском побережье, вызванные землетрясениями и тайфунами. Остров Уллындо расположен примерно в 120 км к востоку от побережья Кореи. Основываясь на длительном ряде фоновых данных об уровне моря,

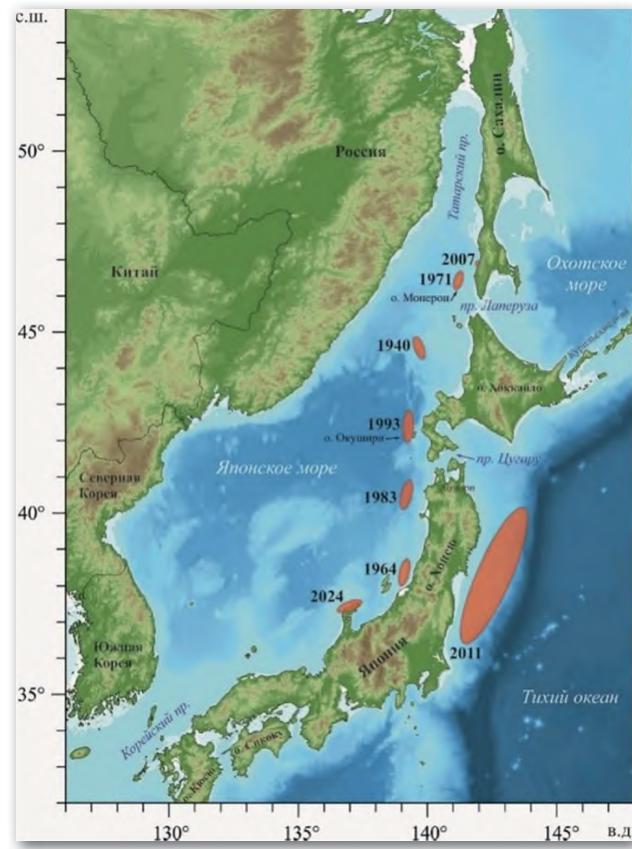


Рис. 1. Карта Японского моря с показанными очагами сильнейших землетрясений (красные овалы)

зарегистрированных на Уллындо и пяти станциях на материке, в [6] оценили передаточные функции между островом и этими пятью станциями. Вычисленные передаточные функции и фактические спектры событий на Уллындо были использованы для реконструкции спектров событий на материке для двух тайфунов 2020 г.— Майсак и Хайшэн, и цунами на полуострове Ното в 2024 г. Согласованность между наблюдаемыми и реконструированными спектрами — достаточно высокая для всех станций и событий. Спектральные особенности длинных волн при тайфунах и цунами принципиально различаются: для тайфунов характерен широкополосный спектр, плавно повышающийся от низких частот к высоким [6]. Другими словами, циклоны формируют сильные длинные волны с малыми периодами (менее 10 минут). Для цунами в Японском море характерен куполообразный спектр, с основным периодом волн в диапазоне от 6 от 40 минут.

Высота волн, достигших северного побережья Японского моря, отличалась в зависимости от местной топографии [7]. Например, в порту Холмск из-за резонансных эффектов (то есть усиления) волны достигали 65 см, тогда как в открытом море их высота не превышала 15 см. Такой эффект оказался связан с несколькими факторами. Наиболее важным было то, что Татарский пролив, отделяющий остров Сахалин от материка, имеет V-образную форму. Из-за нее в проливе «захватываются» длинные волны, а их энергия увеличивается [7]. Кроме того, важную роль сыграли резонансные эффекты, свойственные отдельным бухтам и заливам, например, наложение колебаний приходящих волн на уже имеющиеся в акватории.

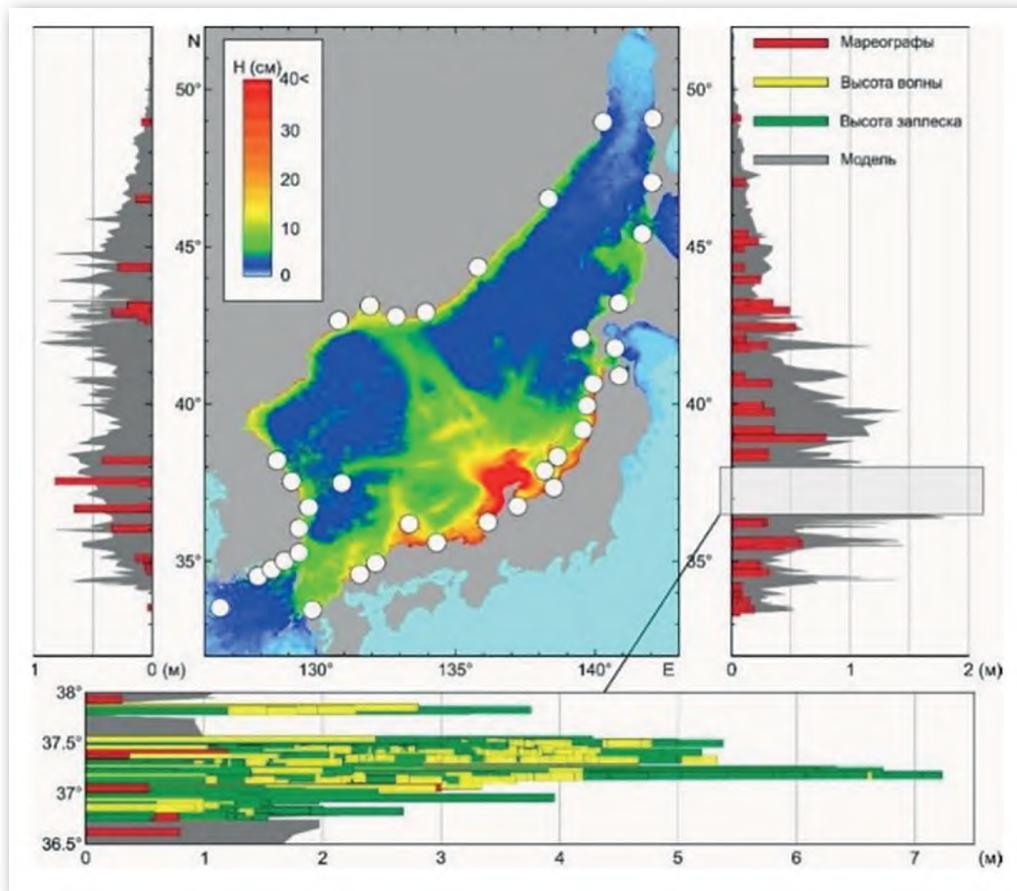


Рис. 2. Численное моделирование максимальных высот волн и диаграммы сравнения результатов моделирования (серый) с данными наблюдений: данные метеографов (красный), высота волны (желтый) и высота заплеска (зеленый)

События цунами, произошедшие в акватории Японского моря за последние десятилетия, являются причиной для уточнения пороговых значений магнитудно-географического критерия для рассматриваемого моря. Так, в частности, землетрясения магнитудой до M_w 7,5 с очагами в южной части Японского моря не являются цунамиопасными для побережья Сахалинской области и Хабаровского края.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 24-17-00313.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цуканова Е. С., Рабинович А. Б., Медведев И. П., Медведева А. Ю. Сильнейшие цунами в Японском море по инструментальным наблюдениям // Океанология. 2025. Т. 65. № 1. С. 46–62. <https://doi.org/10.31857/S0030157425010048>.
2. Kulichkov S. N., Chunchuzov I. P., Popov O. E. et al. Acoustic-gravity Lamb waves from the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, its energy release and impact on aerosol concentrations and tsunami // Pure and Applied Geophysics. 2022. V. 179. P. 1533–1548. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03046-4>.
3. Медведев И. П., Ивельская Т. Н., Рабинович А. Б. и др. Наблюдение волн цунами на тихоокеанском побережье России, возникших при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 года // Океанология. 2024. Т. 64. № 2. С. 163–180.
4. Tsukanova E., Medvedev I. The observations of the 2022 Tonga-Hunga tsunami waves in the Sea of Japan // Pure and Applied Geophysics. 2022. V. 179. № 12. P. 4279–4299. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03191-w>.
5. Tsukanova E., Medvedev I., Heidarzadeh M., Vladimirova I. Tsunami propagation from the 2024 Noto Peninsula earthquake across the Sea of Japan: observations and modelling // Ocean Engineering. 2025. V. 336. 121730. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121730>.
6. Smirnova D. A., Rabinovich A. B. On the use of remote island data to reconstruct sea level spectra associated with the 2020 typhoons Maysak and Haishen and with the 2024 Noto Peninsula tsunami on the eastern Korean coast // Ocean Engineering. V. 337. № 121838. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121838>.
7. Rabinovich A. B., Kovalev P. D. Kovalev D. P. The Noto Peninsula tsunami of 1 January 2024 as observed in the northern Sea of Japan // Ocean Engineering. 2025. V. 337. 120892. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120892>.

ЦУНАМИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

И. П. Медведев¹, канд. физ.-мат. наук,
Д. И. Пилик^{1,2}, Е. С. Цуканова¹

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

TSUNAMI IN THE NORTHERN PART OF THE JAPAN SEA

I. P. Medvedev¹, Ph.D.,
D. I. Pilik^{1,2}, E. S. Tsukanova¹

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of science, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Работа посвящена изучению особенностей проявления двух сильнейших цунами, произошедших в северной части Японского моря — Монеронского цунами 1971 г. ($M_w = 7,5$) и Невельского цунами 2007 г. ($M_w = 6,2$). Для каждого события были воспроизведены волны цунами с помощью модели TUNAMI (модификация И. В. Файна). В качестве входных данных использовались авторские очаги землетрясений, созданные на основе данных каталога ISC-GEM. В результате моделирования были оценены высоты волн цунами как внутри акватории северной части Японского моря, так и на прибрежных территориях. Наибольшие высоты волн в обоих случаях наблюдались на юго-западном побережье о. Сахалин.

This work is devoted to the study of the individual features of the two strongest tsunamis that occurred in the northern part of the Japan Sea — the Moneron tsunami of 1971 ($M_w = 7.5$) and the Nevelsk tsunami of 2007 ($M_w = 6.2$). Tsunami waves were reproduced for each event using the TUNAMI model (modified by I. V. Fine). The author's tsunami sources, created based on the data from the ISC-GEM catalog, were used as input data for modeling. As a result of the simulation, the heights of tsunami waves were estimated both inside the waters of the northern part of the Japan Sea and in coastal areas. The highest wave heights in both cases were observed on the southwestern coast of the Sakhalin island.

Японское море является одним из цунамиопасных районов для российского побережья, что связано с большим количеством землетрясений разных масштабов, происходящих здесь. Наиболее сильными цунами, приуроченными к данной акватории, являются: Ниигатское 1964 г. ($M_w = 7,5$), Монеронское 1971 г. ($M_w = 7,5$), Япономорское 1983 г. ($M_w = 7,7$), Окуширское 1993 г. ($M_w = 7,8$), Невельское 2007 г. ($M_w = 6,2$), Ното 2024 г. ($M_w = 7,5$). Данная работа посвящена исследованию проявления двух сильнейших исторических цунами, которые произошли в северной части Японского моря,— Монеронского цунами 1971 г. и Невельского цунами 2007 г.

Монеронское землетрясение с магнитудой $Mw = 7,5$ произошло 05.09.1971 в 18:35 UTC около о. Монерон, в 43 км от побережья о. Сахалин. Это было первое крупное землетрясение, зафиксированное в северной части Японского моря. В результате были сгенерированы волны цунами с высотами — 30–40 см по данным мариографов и до 2 м по данным визуальных наблюдений.

Невельское землетрясение с магнитудой $Mw = 6,2$ произошло 02.08.2007 в 02:37 UTC у побережья г. Невельск. Несмотря на то, что магнитуда землетрясения не являлась цунамигенной, были зафиксированы волны цунами с высотами до 40–50 см по данным мариографов и до 1–1.8 м по данным визуальных наблюдений.

Для генерации волн цунами и изучения особенностей их проявления на побережье использовалась гидродинамическая модель TUNAMI (авторская модификация И. В. Файна [1]). В качестве исходных данных в модель задавался рельеф дна Японского моря (GEBCO 2014) и данные о геометрии сейсмического очага. Изначальные параметры сейсмических очагов были взяты из каталога ISC-GEM. На их основе были созданы авторские очаги землетрясений для обоих событий, параметры которых рассчитывались с помощью формул Окады [2].

Для верификации и валидации модели использовались данные метеографных станций на побережье. Для Монеронского цунами использовалось 11 записей, для Невельского — 2. В случае Невельского цунами также была использована запись придонного датчика гидростатического давления, установленного в Холмске [3]. Расположение метеографов представлено на рис. 1.

Монеронское цунами 1971 г. Для воспроизведения цунами в результате Монеронского землетрясения было произведено несколько численных экспериментов с использованием различных сейсмических очагов (табл. 1). Наилучшим в результате сравнения с данными метеографов был признан очаг № 3, который является модификацией очагов № 1 и № 2 (ISC-GEM).

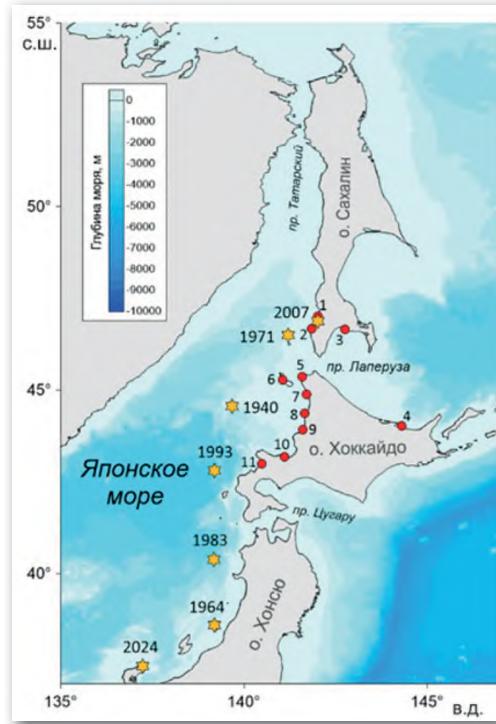


Рис. 1. Сильнейшие исторические цунами в Японском море (цифрами обозначены метеографные станции: 1 — Холмск, 2 — Невельск, 3 — Корсаков, 4 — Абасири, 5 — Вакканай, 6 — Кафука, 7 — Тешио, 8 — Хаборо, 9 — Румои, 10 — Ошоро, 11 — Иванай)

Таблица 1

Параметры очагов Монеронского землетрясения (1971 г.)

№	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Глубина гипоцентра, км	M_w	Strike, °	Dip, °	Rake, °	Slip, м	Длина, км	Ширина, км
1	46,51	141,20	18,1	7,3	184	54	83	1,4	58,9	26,0
2	46,51	141,20	18,1	7,3	16	39	99	1,4	58,9	26,0
3	46,5	141,0	18,1	7,3	30	39	99	1,4	60,0	25,0

Для данного очага представлено сравнение данных моделирования с данными метеографа на станции Невельск (рис. 2а). Модель хорошо воспроизводит амплитуду и период колебаний уровня моря, однако заметно сильное превышение амплитуды первой приходной волны по данным моделирования. Данная ситуация может объясняться строением метеографа, а именно заиленностью подводящей трубы, соединяющей между собой открытое море и колодец метеографа, в результате чего метеограф не полностью воспроизвел амплитуду первой волны. Эта ситуация отмечалась в работе [4].

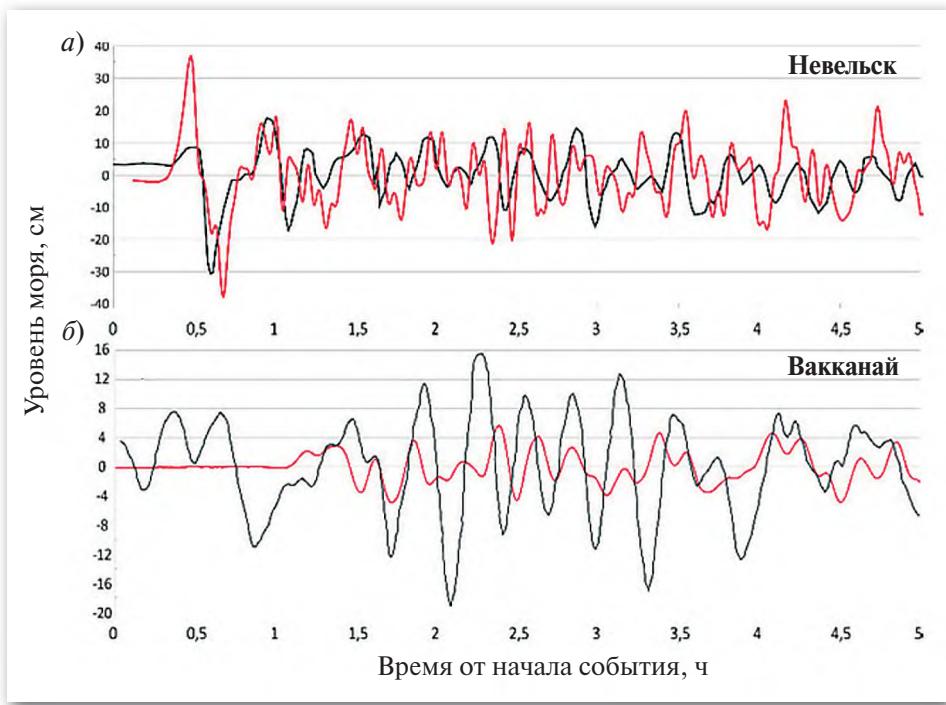


Рис. 2. Сравнение данных моделирования (красная линия) и данных прибрежных метеографов (черная линия) для Монеронского (а) и Невельского (б) цунами

В результате моделирования были получены величины максимальных высот волн цунами как на побережье, так и в открытой части акватории. Максимум высоты наблюдался в непосредственной близости от источника и составлял более 1 м. Далее волна распространялась к побережью, где ее высоты достигали 0,6 м на юго-западном побережье о. Сахалин, 0,5 м на побережье Приморья и 0,6 м на северной оконечности о. Хоккайдо.

Невельское цунами 2007 г. Для Невельского цунами также проводились несколько экспериментов с разными сейсмическими очагами (табл. 2). Параметры очагов № 1 и № 2 взяты из каталога ISC-GEM. Наилучшим же был признан очаг № 3, который для лучшего воспроизведения колебаний уровня был сдвинут к западу от побережья, чтобы не затрагивать сушу. Также была увеличена величина подвижки земной коры до 3 м.

Таблица 2
Параметры очагов Невельского землетрясения (2007 г.)

№	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Глубина гипоцентра, км	M_w	Strike, °	Dip, °	Rake, °	Slip, м	Длина, км	Ширина, км
1	46,87	142,02	10,0	6,19	184	48	91	0,28	16,41	10,63
2	46,87	142,02	10,0	6,19	3	42	89	0,28	16,41	10,63
3	46,87	141,83	10,0	6,19	184	48	91	3,0	16,41	10,63

Для данного очага представлено сравнение данных моделирования с данными метеографа на станции Вакканай (рис. 2б). Отмечено, что модель достаточно хорошо воспроизводит периоды колебаний, но сильно занижает амплитуды в сравнении с натур-

ными данными. Это объясняется прохождением атмосферного возмущения (скачок атмосферного давления составил 3 гПа) над акваторией Японского моря в момент землетрясения, которое вызвало увеличение интенсивность колебаний на метеографных постах. Сделано предположение о наличии метеоцунами [5].

Максимум высоты Невельского цунами по данным моделирования наблюдался также в непосредственной близости от источника и составлял 0,56 м. Распространяясь к побережью, высоты уменьшались и в итоге составляли 0,45 м на юго-западном побережье о. Сахалин, 0,1 м на побережье Приморья и 0,2 м на северной оконечности о. Хоккайдо.

В работе рассмотрены два исторических события, произошедших в северной части Японского моря — Монеронское цунами 1971 г. и Невельское цунами 2007 г. Для каждого события по итогам сравнения данных моделирования и данных с метеографных станций был выявлен сейсмический очаг, который наилучшим образом воспроизводил колебания уровня моря. На основе моделирования были выявлены особенности распространения и проявления на побережье волн цунами в результате обоих событий. Наибольшие высоты в обоих случаях были приурочены к гипоцентру землетрясения и составляли 1 м для Монеронского цунами и 0,56 м для Невельского. На побережье максимальные высоты приурочены к юго-западному побережью о. Сахалин.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-17-00313.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fine I. V., Kulikov E. A., Cherniawsky J. Y.* Japan's 2011 tsunami: Characteristics of wave propagation from observations and numerical modelling // Pure and Applied Geophysics. 2013. V. 170. № 6. P. 1295–1307.
2. *Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the seismological society of America. 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.
3. *Шевченко Г. В., Ивельская Т. Н.* Цунами и другие опасные морские явления в портах Дальневосточного региона России (по инструментальным измерениям) // Препр. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. 2013.
4. *Костенко И. С., Зайцев А. И. и др.* Монеронское цунами 1971 года и его проявления на побережье о-ва Сахалин по результатам численного моделирования // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 1. С. 3–12.
5. Japan Meteorological Agency. Monthly report on earthquakes and volcanoes in Japan. 2007.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦУНАМИ 2004 И 2005 ГОДОВ В ИНДИЙСКОМ ОКЕАНЕ НА ОСНОВЕ ЗАПИСЕЙ МАРЕОГРАФОВ И ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Ю. Медведева¹, А. Б. Рабинович^{1,2}, д. ф.-м. н.

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Институт океанологии, Сидни, Канада

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE 2004 AND 2005 INDIAN OCEAN TSUNAMIS BASED ON TIDE GAUGE RECORDS AND NUMERICAL MODELLING RESULTS

A. Yu. Medvedeva¹, A. B. Rabinovich^{1,2}, Dr. Phys.-Math. Sci.

¹Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, Russia

²Institute of Ocean Sciences, Sidney, Canada

28 марта 2005 г. у побережья Суматры (Индонезия) произошло сильное землетрясение магнитудой M_w 8,6. Оно вызвало значительное цунами. Произошло это землетрясение и цунами спустя всего три месяца после катастрофического суматранского цунами от 26 декабря 2004 г., поэтому, можно сказать, осталось «незамеченным» и мало изученным, хотя землетрясение такой магнитуды — это очень мощное событие. Примечательно, что и механизм землетрясения в обоих случаях был схож, однако второе землетрясение не вызвало столь разрушительного цунами, как цунами 2004 г. Тем не менее волны от землетрясения 2005 г. были зарегистрированы по всему Индийскому океану. Мы проанализировали записи с 12 метеорографов. Максимальная высота волн (87 см) была зафиксирована в Салале (Оман). Доминирующие периоды волн составили 60–66, 40–48 и 20 минут. Среднее отношение высот волн цунами 2004 и 2005 гг. составило 5,11, а средний энергетический индекс цунами 2005 г. оказался в 16 раз меньше. Численное моделирование распространения цунами, основанное на сейсмической модели USGS, в целом хорошо согласуется с наблюдениями и позволяет объяснить различия между двумя событиями ориентацией и расположением их источников.

On March 28, 2005, a strong Mw 8,6 earthquake occurred off the coast of Sumatra, Indonesia, generating a significant tsunami. This earthquake and tsunami took place just three months after the catastrophic December 26, 2004 Sumatra tsunami and, as a result, could be considered as having gone relatively “unnoticed” and understudied, despite an earthquake of such magnitude being a very powerful event. It is noteworthy that the earthquake mechanism was similar in both cases, yet the second event did not produce a tsunami as destructive as the 2004 one. Nevertheless, the waves from the 2005 earthquake were recorded throughout the Indian Ocean. We analyzed records from 12 tide gauges. The maximum wave height (87 cm) was recorded at Salalah, Oman. The dominant wave periods were 60–66, 40–48, and 20 minutes. The average ratio of the 2004 to 2005 tsunami wave heights was 5.11, and the mean energy index of the 2005 tsunami was 16 times smaller. Numerical modeling of the tsunami propagation, based on the USGS seismic model, generally agrees well with observations and allows the differences between the two events to be explained by the orientation and location of their sources.

Катастрофическое цунами 26 декабря 2004 г. (M_w 9,1–9,3) стало поворотной точкой в исследованиях цунами и толчком для внедрения и развития системы предупреждения в Индийском регионе. Всего через три месяца, 28 марта 2005 г., в том же регионе (Зондская плита — Австралийская плита) произошло еще одно мощное землетрясение M_w 8,6. Несмотря на схожие механизмы очагов (рис. 1), вызванное им цунами было значительно слабее. Это событие осталось в тени катастрофы 2004 г. и было менее детально изучено.

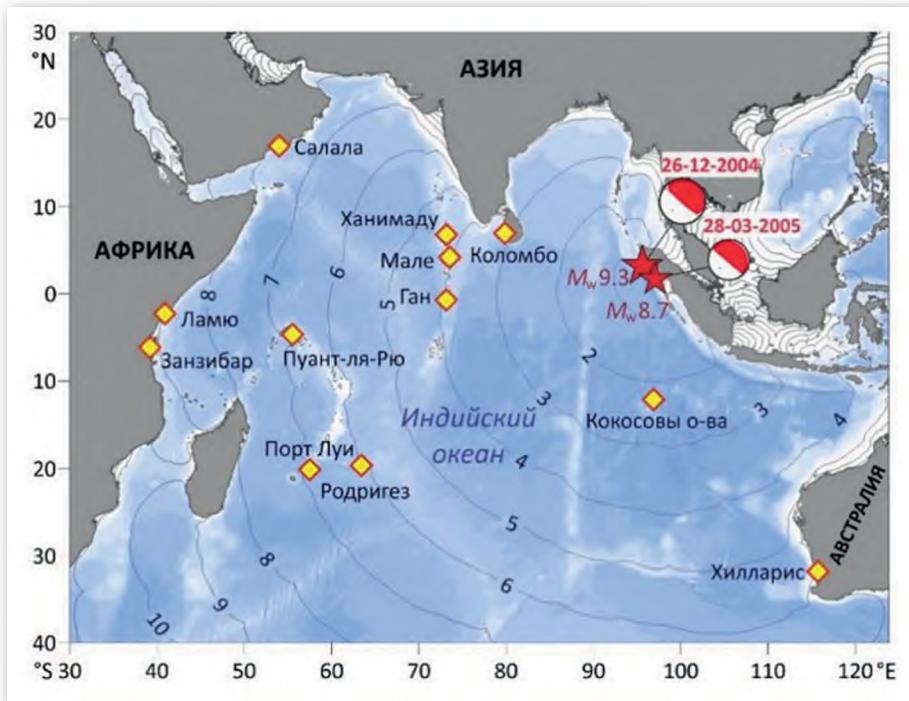


Рис. 1. Расположение метеографов, время добегания цунами от землетрясения 28 марта 2005 г. (часы), механизмы землетрясений 26 декабря 2004 и 28 марта 2005 г.

Цели данного исследования: 1) на основе записей метеографов Индийского океана сравнить статистические и спектральные характеристики цунами 2004 и 2005 гг.; 2) оценить, насколько точно численные модели могут воспроизвести волновые формы цунами 2005 г.; 3) исследовать влияние местоположения и ориентации очага на свойства распространяющихся волн.

Данные и методы. Для анализа отобраны записи с 12 станций, расположенных в Индийском океане (рис. 1). Эти же станции использовались и для анализа цунами 2004 г., что позволяет проводить прямые сравнения. Станции условно разделены на «восточную» и «западную» группы. Временной шаг записей варьировался от 1 до 15 минут. Исходные записи уровня моря были обработаны стандартными методами: приливная составляющая удалена методом наименьших квадратов, а низкочастотные колебания отфильтрованы с помощью четырехчасового окна Кайзера-Бесселя. Для анализа частотного состава использовался метод множественной фильтрации (вейвлет-анализ), позволяющий построить частотно-временные ($f-t$) диаграммы.

Для численного моделирования применялась линейная модель мелкой воды Исаака Файна [1], которая является усовершенствованной версией модели TUNAMI. Вычисления проводились для всего Индийского океана на основе батиметрической сетки GEBCO-2014 с разрешением 2 угловые минуты. В качестве исходного возмущения использовалось поле смещения морской поверхности, рассчитанное по модели Окада по данным с сайта Геологической службы США USGS для землетрясения 2005 г.

Анализ результатов. Цунами 2005 г. было четко зарегистрировано на всех 12 станциях (рис. 2). Первая волна прибыла на Кокосовы острова через 1 час 54 минуты после землетрясения. Высоты волн на большинстве станций были относительно небольшими (12–54 см), за исключением станции Салала (87 см). Учет занижения амплитуд из-за редкого сбора данных (особенно на о. Родригес, $\Delta t = 15$ мин) позволяет предположить,

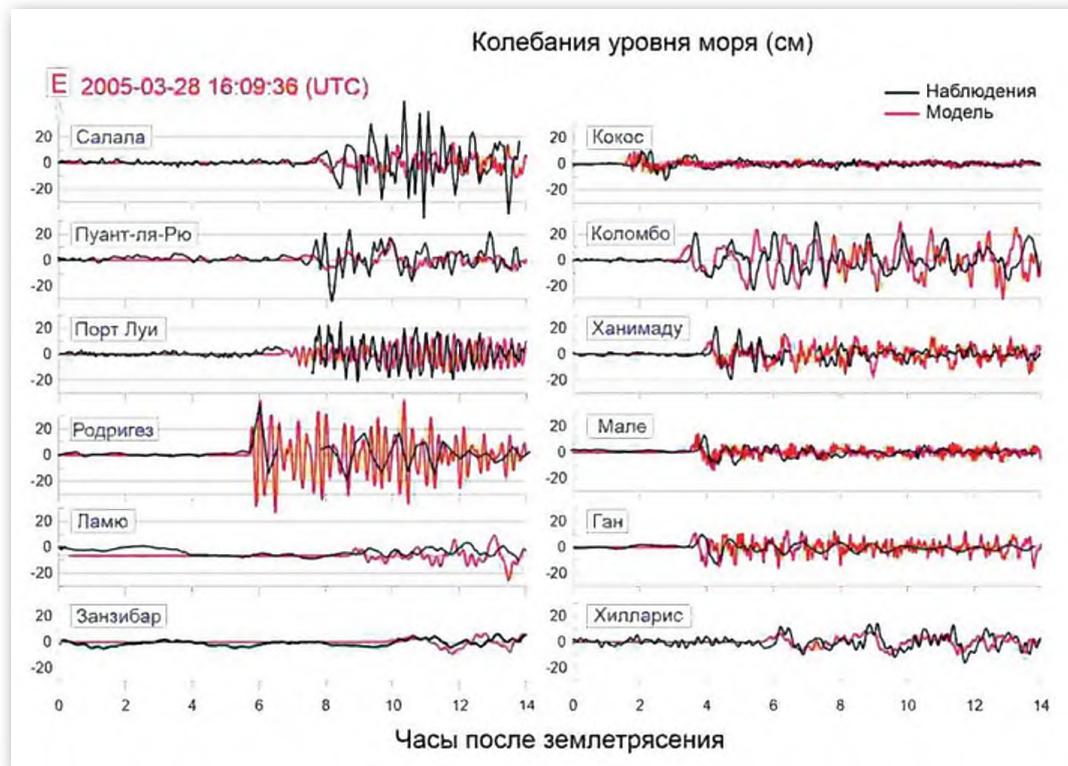


Рис. 2. Записи уровня моря (см) на станциях и результаты моделирования

что реальные высоты волн могли быть больше (~ 95 см в Салала, ~ 105 см на станции Родригес). На всех станциях, кроме Пуант-ля-Рю, первой приходила положительная волна (гребень), что согласуется с дипольным характером очага.

Частотно-временные диаграммы показывают резкий рост энергии в момент прихода цунами. Выделяются общие для групп станций периоды: 60–66, 40–48 и 20 минут, которые, вероятно, связаны с источником цунами 2005 г. На станциях, расположенных на материке или крупных островах (Салала, Хилларис, Коломбо), наблюдалось длительное затухание колебаний («звон»), вызванное многократными отражениями от берегов.

Энергия цунами $E(t)$ оценивалась как дисперсия уровня моря за шестичасовые сегменты с временным сдвигом 2 часа. Средний энергетический индекс E_0 для цунами 2005 г. составил ~ 65 см 2 , что в 16 раз меньше, чем для цунами 2004 г. (~ 1020 см 2). Максимальное значение E_0 для обоих событий отмечено в районе станции Салала (Аравийское море), где энергия цунами, по-видимому, захватывается. Из-за короткой продолжительности записей надежно оценить время затухания (t_0) удалось только для о-вов Кокос ($t_0 \approx 10,6$ ч), где оно оказалось меньше, чем в среднем для цунами 2004 г. (13,8 ч).

Результаты моделирования (рис. 3) хорошо воспроизводят наблюдения: основная энергия волн распространилась на юго-запад. Сравнение смоделированных и наблюдаемых волновых форм для 12 станций показывает хорошее согласие по фазе и времени прихода. Расхождения в амплитудах (например, для Родригеса и Салала) объясняются локальными резонансными эффектами, не учитываемыми моделью с грубым разрешением.

Для оценки влияния ориентации разлома были проведены численные эксперименты с тремя сценариями очага: фактическим 2005 г. (D), смещенным к северу (N) и к югу (S). Результаты подтвердили, что источник N (близкий к очагу 2004 г.) излучает больше энергии на запад, а источник D (2005) — на юго-запад. Также волны, распространяющиеся на северо-запад, имели более длинные периоды (~ 2 часа), чем волны, идущие на юг и юго-запад.

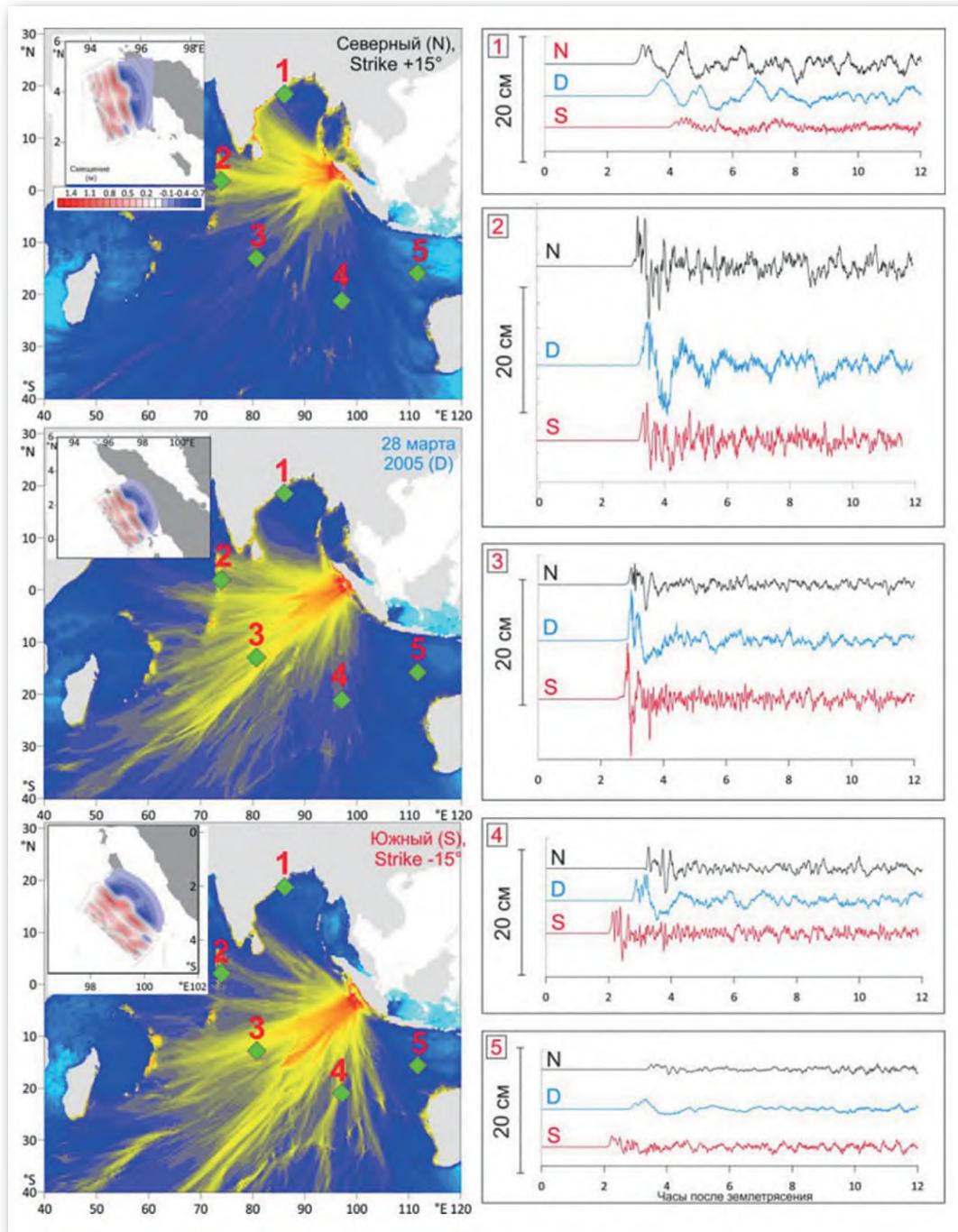


Рис. 3. Результаты моделирования с тремя сценариями очага

Цунами 28 марта 2005 г. вновь продемонстрировало высокую цунамигенную опасность зоны субдукции Суматра-Андаман. Хотя его энергия была в среднем в 16 раз меньше, чем у цунами 2004 г., оно распространилось по всему Индийскому океану.

Проведенное исследование показывает, что ключевыми факторами, объясняющими различия между этими двумя событиями, являются не столько магнитуда или механизм очага, которые были схожи, сколько точное местоположение и ориентация разлома относительно батиметрии. Это обусловило разную направленность излучения энергии и различные частотные характеристики волн.

Полученные результаты подчеркивают, что для точной оценки цунамиопасности региона необходимо учитывать не только ожидаемую магнитуду землетрясения, но и пространственную структуру его очага. Численное моделирование является эффективным инструментом для такого анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fine I. V., Kulikov E. A., Cherniawsky J. Y. Japan's 2011 tsunami: Characteristics of wave propagation from observations and numerical modelling // Pure Appl. Geophys. 2013, № 170, P. 1295–1307.*

ОЦЕНКА ОБЛАСТИ ПРИМЕНИМОСТИ ТЕОРИИ МЕЛКОЙ ВОДЫ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЦУНАМИ НА ПРИМЕРЕ СОБЫТИЙ ТИХООКЕАНСКОГО РЕГИОНА

А. И. Зарубина¹, М. А. Носов^{1,2}, д-р физ.-мат. наук

¹Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН,
Южно-Сахалинск, Россия

ASSESSMENT OF THE AREA OF APPLICABILITY OF THE SHALLOW-WATER THEORY FOR REPRODUCING TSUNAMI USING THE EXAMPLE OF EVENTS IN THE PACIFIC REGION

A. I. Zarubina¹, M. A. Nosov^{1,2}, Dr. Sc.

¹Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Разработан метод оценки области пространства, в которой теория длинных волн способна воспроизводить диспергирующие цунами с заданной точностью. Точность оценивалась по степени запаздывания диспергирующего волнового пакета, рассчитываемой вдоль волновых лучей, исходящих из центра источника под различными азимутальными углами. Вдоль каждого из лучей с учетом формы начального возвышения и распределения глубин океана определялся доминирующий период волн. По доминирующему периоду и профилю глубин вдоль луча рассчитывалось дисперсионное отставание. Работа метода продемонстрирована на примере трех цунами — событий Тихоокеанского региона.

A method has been developed for estimating the region of space in which the theory of long waves is able to reproduce dispersing tsunamis with a given accuracy. The accuracy was estimated by the degree of delay of the dispersing wave packet, calculated along the wave rays emanating from the center of the source at various azimuthal angles. Along each of the rays, taking into account the shape of the initial elevation and the distribution of ocean depths, the dominant wave period was determined. The dispersion lag was calculated based on the dominant period and depth profile along the ray. The operation of the method is demonstrated by the example of three tsunami events in the Pacific region.

Модели динамики волн цунами в большинстве случаев строятся на основе теории мелкой воды (длинных волн). Существенный недостаток таких моделей заключается в их ограниченной способности к воспроизведению диспергирующих волн. Попытки введения критерии, позволяющих судить об области применимости длинноволновых моделей, предпринимались многими авторами [1–8]. Субъективность оценки точности воспроизведения волн, а также неоднозначность определения параметров, входящих в критерии, мотивировали нас к разработке собственного подхода, свободного от отмеченных недостатков.

В работе [9] мы предложили объективную количественную меру точности воспроизведения волн и установили ее связь со степенью запаздывания диспергирующего волнового пакета от фронта длинных волн. На основе полученных результатов в работе [10] был разработан практический метод оценки области пространства, в которой бездисперсионная теория длинных волн способна воспроизводить диспергирующие волны цунами с заданной точностью.

Судить о точности мы предлагаем по степени запаздывания диспергирующего волнового пакета, которая рассчитывается вдоль набора волновых лучей, выпущенных

из центра источника под различными азимутальными углами. Оценка степени запаздывания диспергирующего волнового пакета относительно фронта длинной волны рассчитывалась по следующей формуле:

$$\delta T = \int_0^x \left(\frac{d\hat{x}}{C_{gr}(\hat{x})} - \frac{d\hat{x}}{\sqrt{gH(\hat{x})}} \right), \quad (1)$$

где C_{gr} — групповая скорость волн, g — ускорение силы тяжести, H — глубина океана, \hat{x} — пространственная координата, отсчитываемая вдоль луча от центра источника. В рамках этой работы мы рассматриваем классическую дисперсию гравитационных поверхностных волн на воде, которая характеризуется дисперсионным соотношением

$$\omega^2 = gk \tanh(kH), \quad (2)$$

где k — волновое число. Групповая скорость в этом случае определяется следующей формулой:

$$C_{gr} = \frac{g(kH / \cosh^2(kH) + \tanh(kH))}{2\sqrt{gk \tanh(kH)}}. \quad (3)$$

Расчет волновых лучей реализован на сферической поверхности с учетом рельефа дна, который был сглажен для удовлетворения условиям применимости лучевой теории. Вдоль каждого из лучей с учетом формы начального возвышения в очаге цунами и распределения глубин океана определялся доминирующий период волн цунами T_{max} . Методика определения доминирующего периода описана в работе [10]. По доминирующему периоду и профилю глубин вдоль луча рассчитывалась степень запаздывания диспергирующего волнового пакета.

Ранее метод был применен к двум цунами — событиям на Центральных Курильских островах (Симуширские цунами 15.11.2006 и 13.01.2007). В связи с этим цель настоящей работы — апробация метода на других событиях тихоокеанского региона.

На рис. 1 представлены опорные лучи, цвет которых варьируется в зависимости от степени запаздывания диспергирующего волнового пакета $\delta T / T_{max}$ в соответствии со шкалой, показанной в верхнем правом углу рисунка. Расчеты выполнены для источников цунами Loyalty Islands, 20.05.2023 (рис. 1а), Illapel, Chile, 16.09.2015 (рис. 1б) и Great Tohoku Earthquake, 11.03.2011 (рис. 1в). Расчет величины $\delta T / T_{max}$ проводился непосредственно от центра источника цунами, но опорные лучи вблизи источника не прорисованы, чтобы была видна форма и ориентация источников цунами.

В работе [9] было показано, что с вероятностью 90% следует выбирать значение корректирующего коэффициента $\alpha = \delta T / T_{max} < 0.2$ для обеспечения точности воспроизведения диспергирующих волн длинноволновой моделью $\delta < 0.4$. Будем рассматривать значение $\alpha = 0.2$ в качестве критического.

На рис. 1а представлено распределение величины $\delta T / T_{max}$, рассчитанное для источника цунами Loyalty Islands 20.05.2023. В данном случае узкий источник способствовал формированию относительно коротких и, следовательно, диспергирующих волн. В северном и юго-западном секторах величина $\delta T / T_{max}$ начинает превышать критическое значение на временном удалении около 1000 с от центра источника, о чем свидетельствуют лучи, окрашенные в светлые цвета. В связи с этим в данных направлениях для корректного воспроизведения волн цунами необходимо использовать дисперсионные модели.

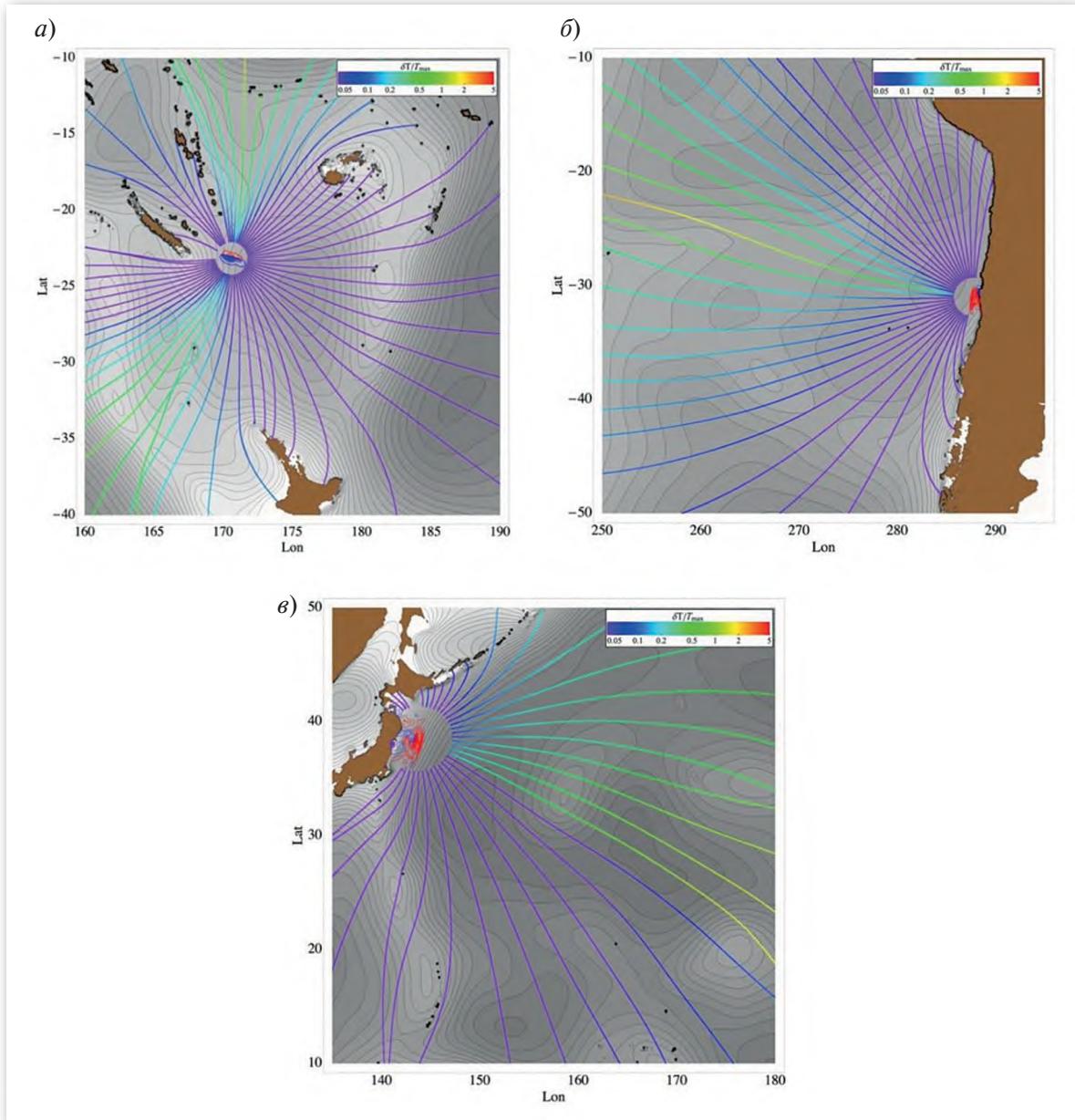


Рис. 1. Степень запаздывания диспергирующего волнового пакета относительно фронта длинных волн $\delta T / T_{\max}$, рассчитанная вдоль опорных лучей, выпущенных из центра источника цунами с шагом по азимутальному углу 5° :
 а — Loyalty Islands, 20.05.2023, б — Illapel, Chile, 16.09.2015, в — Great Tohoku Earthquake 11.03.2011. Величина $\delta T / T_{\max}$ показана в соответствии с цветовой шкалой, изображенной в правом верхнем углу рисунка

Однако в направлениях, где лучи окрашены фиолетовым и темно-синим цветами, модели, построенные на основе бездисперсионных уравнений теории длинных волн, будут достаточно корректно описывать динамику цунами.

На рис. 1б и рис. 1в представлен аналогичный расчет распределения величины $\delta T / T_{\max}$ для источников цунами Illapel, Chile, 16.09.2015 и Great Tohoku Earthquake 11.03.2011 соответственно. Несмотря на значительные горизонтальные размеры этих источников по сравнению с первым событием, в направлении короткой оси очага (западный сектор — рис. 1б, восточный сектор — рис. 1в) мы можем наблюдать превышение критического значения величины $\delta T / T_{\max}$. В связи с этим волны, распространяющиеся в данных направлениях, будут в значительной степени подвержены фазовой дисперсии, и их корректное воспроизведение бездисперсионными моделями мелкой воды невозможно.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kajiura K.* The leading wave of a tsunami // Bull. Earthq. Res. Inst. 1963. V. 41. № 3. P. 535–571.
2. *Kajiura K.* Tsunami source, energy and directivity of wave radiation // Bull. Earthq. Res. Inst. 1970. V. 48. № 5. P. 835–869.
3. *Пелиновский Е. Н.* Гидродинамика волн цунами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996. 276 с.
4. *Пелиновский Е. Н.* Нелинейная динамика волн цунами. Горький: ИПФ АН СССР, 1982. 216 с.
5. *Mirchina N. R., Pelinovsky E. N.* Nonlinear and dispersive effects for tsunami waves in the open ocean // Int. J. Tsunami Soc. 1982. V. 2. № 4. P. 1073–1081.
6. *Kulikov E. A., Rabinovich A. B., Thomson R. E. et al.* The landslide tsunami of November 3, 1994, Skagway harbor, Alaska // J. Geophys. Res.: Oceans. 1996. V. 101. № C3. P. 6609–6615.
7. *Glimsdal S., Pedersen G. K., Harbitz C. B. et al.* Dispersion of tsunamis: does it really matter? // Nat. Hazard. Earth. Syst. Sci. 2013. V. 13. № 6. P. 1507–1526.
8. *Носов М. А.* Применимость длинноволнового приближения к описанию динамики цунами // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 4. С. 1740503.
9. *Носов М. А., Зарубина А. И.* Критерий применимости теории длинных волн для описания диспергирующих волн цунами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 4. С. 485–496. DOI: 10.31857/S0002351523040132.
10. *Nosov M. A., Zarubina A. I., Kolesov S. V.* Assessment of the Area of Applicability of the Shallow-Water Approximation for Reproducing Dispersive Tsunami Waves // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2025. Т. 61. № 4. С. 420–430.

ЦУНАМИГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2024 ГОДА ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО ДЕФОРМОГРАФА

С. Г. Долгих¹, чл.-корр. РАН

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН,
Владивосток, Россия

TSUNAMIGENIC EARTHQUAKES OF 2024 ACCORDING TO THE LASER STRAINMETER

S. G. Dolgikh¹, corr. Member of RAS

¹V. I. Il'ichev Pacific Oceanological institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

В работе рассматриваются натурные данные лазерного деформографа в момент регистрации землетрясений, произошедших в январе и апреле 2024 г. По данным лазерно-интерференционного прибора деформационным методом было определено, являются ли эти землетрясения цунамигенными или нет. Дальнейшая обработка записей прибора позволила выявить деформационные аномалии, характерные для цунамигенных землетрясений, и рассчитать смещение морского дна в месте образования цунами. Для расчета использовался усредненный коэффициент расходности зарегистрированных лазерным деформографом деформационных аномалий для тихоокеанского региона. С использованием этих величин можно при дальнейших модельных расчётах определить высоты волн возможных цунами, возникших в результате смещений морского дна.

The paper considers the full-scale data of a laser strainmeter at the time of registration of earthquakes that occurred in January and April 2024. According to the data of the laser interference device, it was determined by the deformation method whether these earthquakes are tsunamigenic or not. Further processing of the instrument's recordings made it possible to identify deformation anomalies characteristic of tsunamigenic earthquakes and calculate the displacement of the seabed at the tsunami formation site. The average coefficient of divergence of the deformation anomalies recorded by the laser strainmeter for the Pacific region was used for the calculation. Using these values, it is possible to determine the wave heights of possible tsunamis resulting from the displacement of the seabed in further model calculations.

Для обнаружения и предупреждения цунами создано много регистрирующих приборов, большинство из которых устанавливается на морское дно или на поверхность моря: это системы раннего предупреждения цунами [1], спутниковые навигационные системы [2], подводные сейсмические датчики [3] и другие. По данным этих приборов разработано множество методов оценки и прогнозирования цунами. На основе сейсмических данных разработан сейсмический метод предупреждения о цунами, основанный на обнаружении W-фазы, которая проявляется между P и S волнами на записях приборов. К сейсмическим методам оценки цунамигенности землетрясений можно отнести и деформационный метод, который получил развитие в последние годы. Суть метода заключается в выявлении деформационного скачка, характерного для цунамигенных землетрясений. Впервые деформационный скачок был выявлен при анализе записей лазерного деформографа в момент регистрации землетрясения, произошедшего в Индонезии в 2004 г. С помощью этого метода были проанализированы записи землетрясений, произошедших в период с 2010 по 2020 гг. в таких цунамиопасных районах как Индонезия, Чили, западное побережье Северной Америки, Япония [4, 5].

В первые месяцы 2024 г. лазерным деформографом, установленным на юге Приморского края на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» было зарегистрировано два цунамигенных землетрясения. Первое землетрясение с магнитудой 7,6 произошло 07:10:09 UTC1 января, второе с магнитудой 7,4–23:58:11 UTC2 апреля. По данным американской геофизической службы оба этих землетрясения имели метку «возможно возникновение цунами». Эпицентр первого землетрясения находился на западном побережье Японии на оконечности полуострова Ното на глубине 10 км в точке с координатами $37,487^{\circ}\text{N} 137,271^{\circ}\text{E}$. Расстояние от эпицентра землетрясения до места лазерного деформографа составило около 770 км. Сигнал этого землетрясения на записи прибора был зарегистрирован 07:12:05 UTC. На рис. 1 приведены фрагмент записи лазерного деформографа и динамическая спектrogramма этой записи в момент регистрации землетрясения. Как видно из записи прибора, в момент прихода первых колебаний запись начала смещаться вверх. Это смещение и есть деформационный скачок, характерный для цунамигенного землетрясения. Величина этого скачка составила 13,5 мкм, а его длительность — чуть меньше 9 мин.

На динамической спектrogramме записи (рис. 1 нижний) выделяются колебания с периодами около 10 и 14 с, характерными для землетрясения, и колебания в более низкочастотной области. Колебания в более низкочастотной области присутствуют только при анализе записей цунамигенных землетрясений. На динамических спектrogramмах записи лазерного деформографа не цунамигенных землетрясений амплитуда этих колебаний значительно меньше основных колебаний землетрясения.

Рассмотрим мощное землетрясение, крупнейшее за последние 25 лет на Тайване. Оно произошло 02 апреля 2024 г. в точке с координатами $23,819^{\circ}\text{N} 121,562^{\circ}\text{E}$ на глубине 34,8 км. Эпицентр этого землетрясения располагался на суше, но угроза цунами с максимальной высотой 3 м была объявлена в Японии. Расстояние от эпицентра землетрясения до места лазерного деформографа составило около 2264 км. Сигнал этого землетрясения на записи прибора был зарегистрирован 00:08:14 UTC03 апреля 2024 г. На рис. 2 приведены фрагмент записи лазерного деформографа и динамическая спектrogramма этой записи в момент регистрации землетрясения.

Так же, как и при землетрясении вблизи Японских островов на фрагменте записи лазерного деформографа присутствует деформационный скачок (рис. 2 верхний). Величина этого скачка составила 3,1 мкм, а его длительность — чуть более 6 мин. На динамической спектrogramме (рис. 2 нижний) колебания, характерные для землетрясений, не так ярко выражены. Колебания в более низкочастотной области имеют существенно большую амплитуду и хорошо видны на спектrogramме.

Используя выражение, приведенное в [5], рассчитаем величину смещения дна в эпицентре землетрясения. Для расчета воспользуемся средним значением степени расходимости равным 0,95. В итоге получаем, что для первого землетрясения максимальная величина смещения в эпицентре составляет 5,3 м, а для второго землетрясения — 1,32 м. На сайте американской геофизической службы максимальное модельное смещение в очаге для первого землетрясения составляет 6 м, а для второго землетрясения — 1,31 м. Разница между расчетным значением, полученным по данным лазерного деформографа и модельным смещением для японских островов, обусловлена тем, что мы используем среднее значение степени расходимости. Значение степени расходимости по проведенным ранее исследованиям лежит в диапазоне от 0,941 до 0,952 [5]. А для землетрясения на Тайване значения хорошо согласуются друг с другом.

Применение деформационного метода определения степени цунамигенности землетрясений позволяет существенно дополнить имеющиеся методы. Учитывая точность измерения смещения на базе лазерного деформографа, равной 10 пм, можно утверждать,

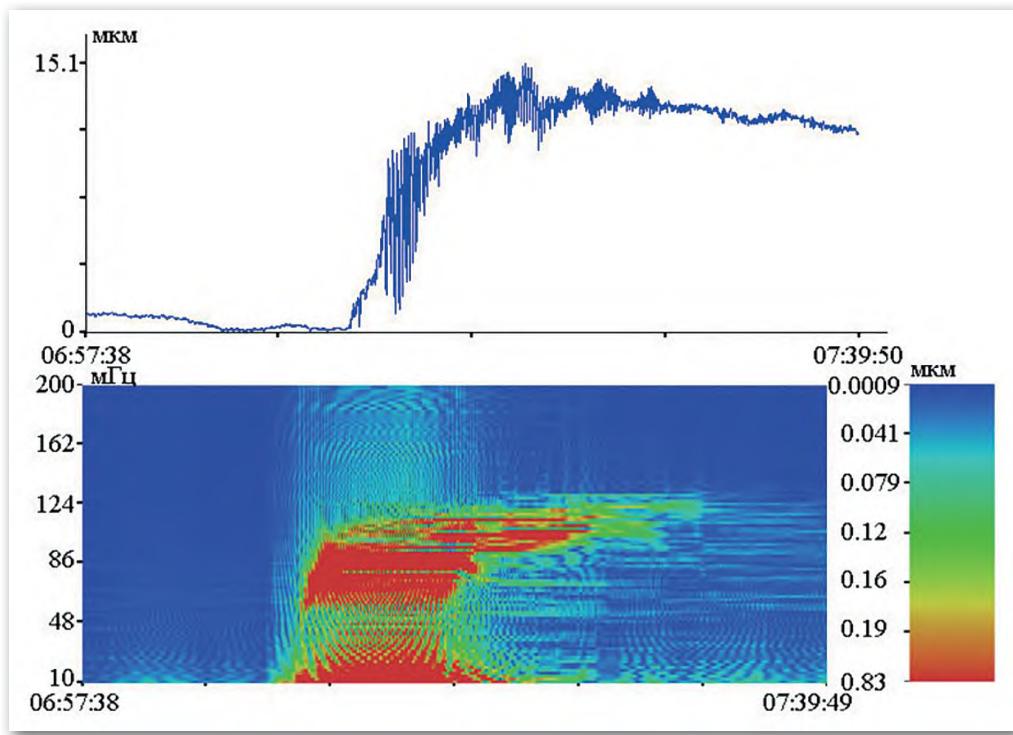


Рис. 1. Фрагмент записи лазерного деформографа (верхний рисунок) и динамическая спектрограмма этой записи (нижний рисунок) за 01 января 2024 г. Время UTC

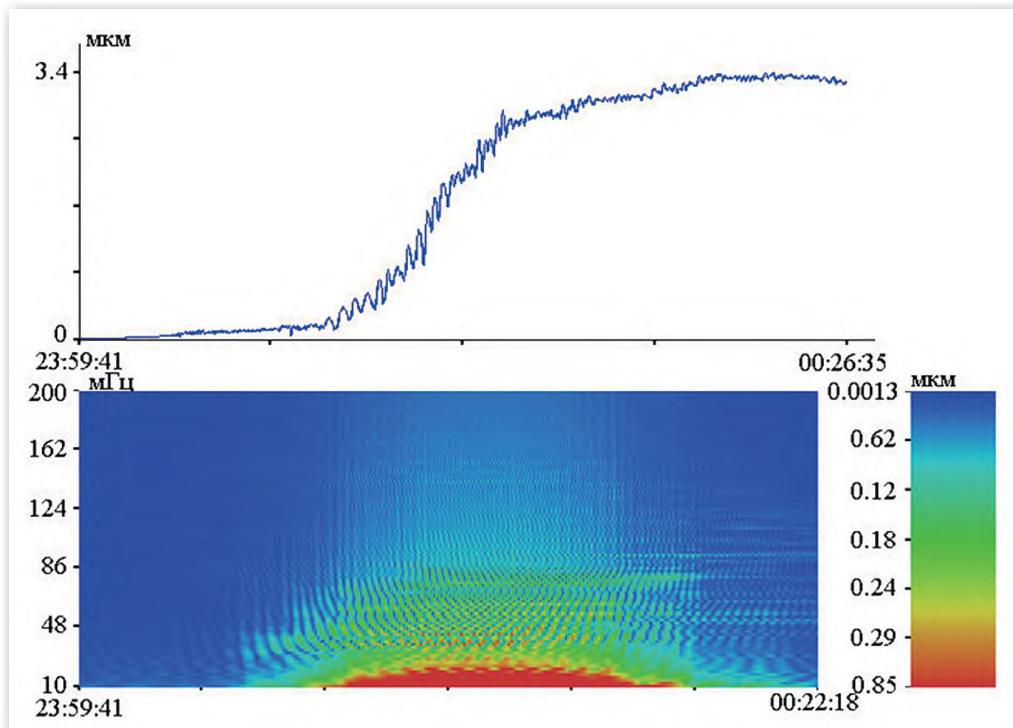


Рис. 2. Фрагмент записи лазерного деформографа (верхний рисунок) и динамическая спектрограмма этой записи (нижний рисунок) за 02–03 апреля 2024 г. Время UTC

что лазерный деформограф способен зафиксировать смещение морского дна в очаге образования цунами на расстоянии 20000 км. Для успешного решения задачи по определению цунамигенности землетрясений необходимы также модельные расчёты, результаты которых при сравнении с экспериментально полученными результатами позволяют разработать наиболее эффективные методы предупреждения опасности цунами.

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы НИР ТОИ ДВО РАН № 125020601583-5 «Нелинейная гидрофизика с приложениями к природным катастрофам Дальневосточного региона».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Percival D. B., Denbo D. W., Eble M. C., Gica E., Mofjeld H. O., Spillane M. C., Tang L., Titov V. V.* Extraction of tsunami source coefficients via inversion of DART® buoy data // Natural Hazards. 2011. 58 (1). P. 567–590. DOI: 10.1007/s11069-010-9688-1.
2. *Stosius R., Beyerle G., Helm A., Hoechner A., Wickert J.* Simulation of space-borne tsunami detection using GNSS-Reflectometry applied to tsunamis in the Indian Ocean // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2010. 10 (6). P. 1359–1372. DOI: 10.5194/nhess-10-1359-2010.
3. *Kanazawa T.* Japan Trench Earthquake and Tsunami Monitoring Network of Cable-linked 150 Ocean Bottom Observatories and its Impact to Earth Disaster Science // Proceedings of the 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT), Tokyo, Japan, 5–8 March 2013; P. 1–5.
4. *Dolgikh G. I., Dolgikh S. G.* Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origination // J. Mar. Sci. Eng. 2021. 9. 1144.
5. *Dolgikh G. I., Dolgikh S. G.* Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origins near the Japanese Islands // J. Mar. Sci. Eng. 2023. 11 (11). 2137.

ВЫЯВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ВРЕДОНОСНЫХ ЦВЕТЕНИЙ ВОДОРОСЛЕЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

В. Г. Бондур¹, акад. РАН, В. В. Замшин¹, О. И. Чверткова¹

¹Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»,
Москва, Россия

IDENTIFICATION OF CONDITIONS FOR THE FORMATION OF DANGEROUS HARMFUL ALGAL BLOOMS BASED ON SATELLITE DATA

V. G. Bondur¹, acad. RAS, V. V. Zamshin¹, O. I. Chvertkova¹

¹Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring «AEROCOSMOS»,
Moscow, Russia

Предложен подход к выявлению условий развития и оценке рисков вредоносных цветений водорослей (ВЦВ) в морских акваториях на основе анализа долговременных рядов разнородных спутниковых данных. Показано, что ключевыми предвестниками катастрофических вредоносных цветений водорослей, происходивших у побережья Чили в 2016 г., у полуострова Камчатка в 2020 г. и у острова Хоккайдо в 2021 г., стали сильные положительные аномалии температуры морской среды и уровня фотосинтетически активной радиации, а также снижение скорости приповерхностного ветра. Подтверждена перспективность предложенного подхода для прогнозирования и предупреждения рисков возникновения аномально сильных ВЦВ на основании информационных продуктов, формируемых с использованием спутниковых данных.

An approach to identifying the growth conditions and assessing the risks of harmful algal blooms (HABs) in marine areas based on the analysis of long-term series of heterogeneous satellite data is proposed. It is shown that the key precursors of catastrophic harmful algal blooms that occurred off the coast of Chile in 2016, off the Kamchatka Peninsula in 2020 and off the island of Hokkaido in 2021 were strong positive anomalies in the temperature of the marine environment and the level of photosynthetically active radiation, as well as a decrease in the speed of the near-surface wind. The prospects of the proposed approach for predicting and preventing the risks of abnormally strong HABs based on information products generated using satellite data are confirmed.

Вредоносные цветения водорослей (ВЦВ) являются одними из опасных природных процессов, происходящих в морских акваториях. Их последствия оказывают существенное негативное влияние на гидробионты и людей, а также ограничивают деятельность по использованию рыбных ресурсов и снижают рекреационный потенциал прибрежных зон [1, 2]. За последние годы в различных акваториях Мирового океана был зарегистрирован ряд событий катастрофического масштаба, связанных с ВЦВ, в том числе такие, которые описаны ниже.

Вредоносное цветение водорослей (рода *Pseudocharonella* и рода *Alexandrium*) в заливах Анкуд и Корковадо у острова Чилоэ (Чили) произошло в феврале-марте 2016 г. [3]. В результате этого ВЦВ была зафиксирована массовая гибель промысловой рыбы (атлантического лосося, кижуча и форели), что привело к крупнейшей в истории экономической потере (около 800 млн \$) на чилийских рыбоводческих фермах [4].

Вредоносное цветение водорослей (рода *Karenia* и рода *Pseudonitzschia*) в Авачинском заливе у полуострова Камчатка (Россия) (развилось в сентябре-октябре 2020 г.), основными последствиями которого стали массовая гибель гидробионтов, ухудшение самочувствия людей и интенсивное пенообразование на побережье [5–7].

Вредоносное цветение водорослей (рода *Karenia*) произошло в акваториях у острова Хоккайдо (Япония) и Южных Курильских островов (Россия) (сентябрь 2021 г.), в результате чего была зафиксирована гибель большого количества морских ежей и лосося в нескольких рыбопромысловых районах Японии, а также был нанесен большой ущерб прибрежным экосистемам [8, 9].

Современные спутниковые средства дистанционного зондирования характеризуются рядом преимуществ, важных для изучения ВЦВ в морских акваториях. Этими преимуществами являются, в том числе: большая обзорность; оперативность; возможность исследования труднодоступных и удалённых районов морей и океанов; возможность получения данных различного пространственного и временного разрешения в различных участках спектра электромагнитных волн; возможность регистрации широкого набора параметров водной среды; высокая достоверность получаемой информации и др. [10].

В настоящей работе предложен подход, позволяющий регистрировать условия возникновения повышенной вероятности развития опасных ВЦВ путем обобщения и комплексного анализа больших объёмов спутниковых данных, поступающих с различных космических систем дистанционного зондирования Земли. Подход основан на том, что используемые значимые параметры водной среды, к которым относятся, прежде всего, положительные аномалии температуры морской поверхности (ТМП) и фотосинтетически активной радиации (ФАР), а также снижение скорости приповерхностного ветра, комплексно воздействуют на экосистемы акваторий [1, 5, 8]. Аномальные изменения этих параметров могут вызывать развитие интенсивных ВЦВ [11].

В предложенном подходе входными параметрами для оценки риска возникновения ВЦВ являются временные ряды информативных критериев, вычисленных в результате обработки временных рядов данных о ТМП, ФАР и скорости приповерхностного ветра. В качестве базового информативного критерия хорошо себя зарекомендовало отношение абсолютного отклонения текущего среднемесячного значения исследуемого значимого параметра к среднеквадратичному разбросу (σ) значений этого параметра. Это отношение обозначается Δ_{σ_m} , где m — порядковый номер анализируемого временного интервала [5, 11].

В рамках такого подхода была предложена и исследована экспериментальная функция оценки уровня риска возникновения ВЦВ. Эта функция \bar{R} задавалась в виде суммы значений величины r (условно названной «комплексным фактором риска»), которые вычислялись для некоторого количества (δ) интервалов временной сетки. Такой приём позволял учесть эффект накопительного действия условий, способствующих возникновению и интенсификации ВЦВ, в течение выбранного интервала времени:

$$\bar{R}_m = \sum_{z=m-\delta}^{m-1} r_z, \quad (1)$$

где r_z — комплексный фактор риска, вычисляемый по нескольким исследуемым параметрам окружающей среды как взвешенная сумма вышеупомянутого отношения Δ_{σ_m} , вычисленного для ТМП, ФАР и скорости приповерхностного ветра при наступлении z -го порядкового интервала времени из диапазона z , от $m-\delta$ до $m-1$ (при этом риск возникновения ВЦВ определяется для временного интервала с номером m , по результатам обработки данных за δ предшествующих интервалов, используемых для вычисления \bar{R}_m). Верхний предел ($m-1$) оператора суммирования в формуле (1) соответствует вычислению риска возникновения ВЦВ \bar{R}_m за один интервал до наступления анализируемого временного интервала m , (например, при использовании ежемесячной временной сетки — за месяц до наступления ВЦВ) [11]).

Предполагалось, что величина $\overline{R_m}$ пропорциональна риску возникновения ВЦВ. Это предположение проверялось в ходе вычислительных экспериментов и анализа их результатов. Для сопоставления величин $\overline{R_m}$ (полученных для различных временных интервалов m) и оценки уровня риска ВЦВ эти значения пересчитывались в проценты относительно исторических максимумов для каждой из исследуемых акваторий. Таким образом, диапазон изменений величин $\overline{R_m}$ лежал в пределах 0–100% [11].

На рис. 1а, б, в приведены графики, иллюстрирующие динамику изменения уровней рисков возникновения ВЦВ в трех исследуемых регионах (а – Чили, б – Камчатка, в – Хоккайдо), полученные с использованием предложенного подхода на основании обработки временных рядов разнородных данных ДЗЗ, накопленных за период времени

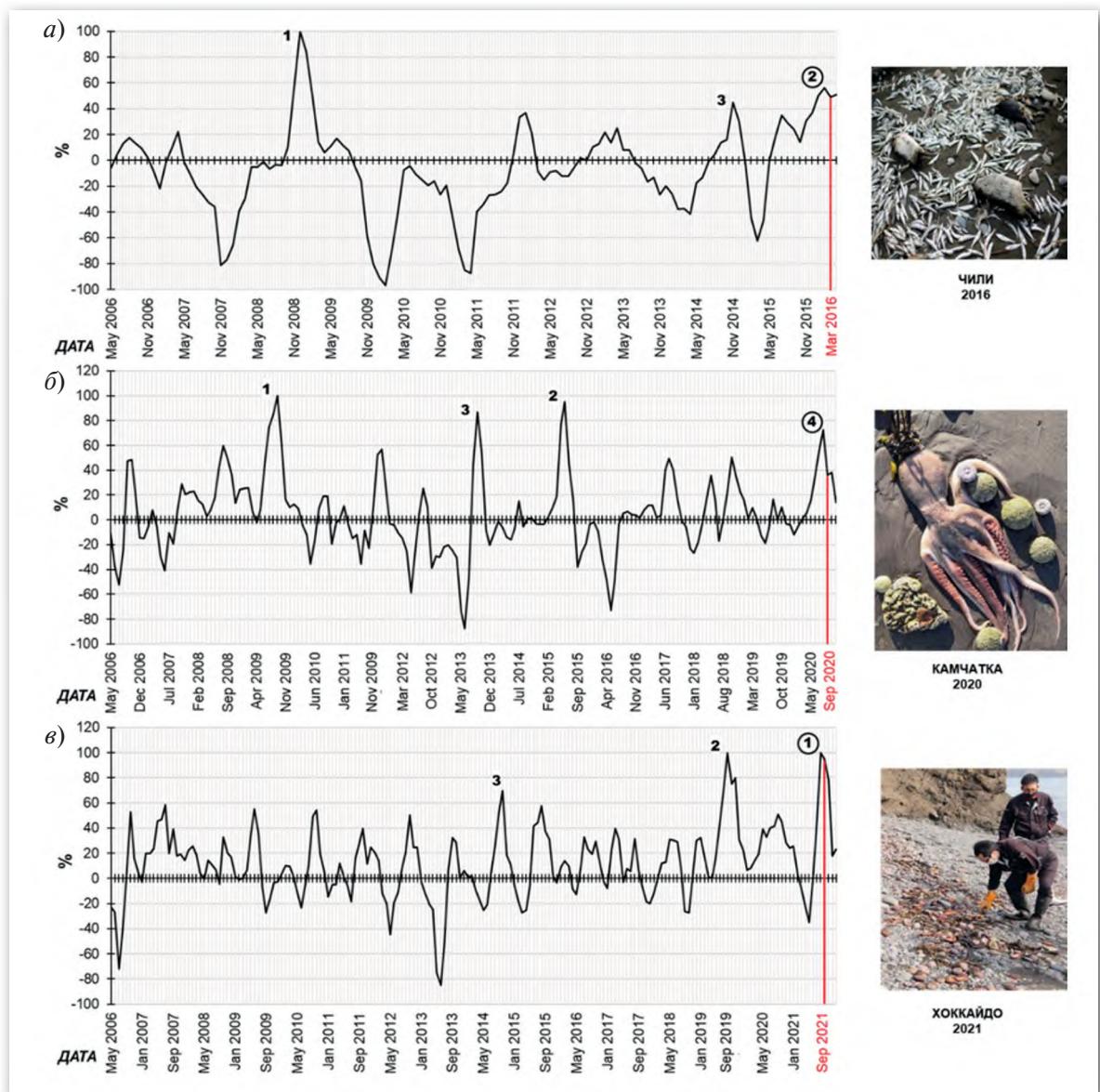


Рис 1. Динамика изменений уровней рисков ВЦВ, вычисленных согласно предложенному подходу:

а – в акватории у острова Чилоэ (Чили, 2006–2016 гг.); б – в акватории Авачинского залива (Камчатка, 2006–2020 гг.); в – в акватории у о. Хоккайдо (Япония, 2006–2021 гг.)

с 2006 по 2021 гг. Красными вертикальными линиями на этих рисунках отмечены события, связанные с тремя исследуемыми ВЦВ.

Цифрами 1–3 на рис. 1 а, в и 1–4 на рис. 1б показаны экстремумы с наиболее высокими значениями рисков возникновений ВЦВ. Номерами в кружках на рисунках 1 а, б, в отмечены максимумы, наблюдавшиеся непосредственно перед тремя исследуемыми катастрофическими ВЦВ.

Анализ рис. 1 показал следующее:

- для всех трёх исследуемых случаев возникновения сильных ВЦВ локальные максимумы функции риска $\overline{R_m}$ (кружки на рис. 1а, б, в) наблюдались приблизительно за один месяц до их начала (красные линии на рис. 1а, б, в);
- эти максимумы обозначены номерами 2, 4 и 1 (см. рис. 1а, б, в соответственно), т. е. являлись или абсолютным экстремумом или входили в число от 2-х до 4-х лидирующих экстремумов.

Выделенные экстремумы $\overline{R_m}$, не отмеченные на рис. 1 кружками (т. е. не относящиеся к трём обсуждаемым событиям ВЦВ), представляют интерес. Проводилась проверка соответствия периодов появления этих максимумов периодам регистрации случаев ВЦВ в исследуемых акваториях. Это позволяло использовать максимумы величин $\overline{R_m}$ в качестве предвестников реальных событий, связанных с возникновением ВЦВ. Для этого был осуществлён анализ литературных данных, а также данных, содержащихся в специализированных базах (в том числе, в (<http://haedat.iode.org/>)), для поиска наличия сведений о проявлениях ВЦВ в трёх исследуемых акваториях на основании натурных измерений. Опубликованные сведения подтверждали соответствие появлению максимумов величин $\overline{R_m}$, пронумерованных на рис. 1, наличию реальных ВЦВ. В большинстве случаев (9 из 10) факт наличия ВЦВ, выявленных на основании наличия максимумов величин $\overline{R_m}$ подтверждался на основе данных натурных измерений [11–13].

Таким образом показано, что на основании ретроспективного анализа спутниковых данных с использованием предложенного подхода были зарегистрированы высокие риски возникновения ВЦВ, абсолютное большинство из которых (9 из 10) были подтверждены данными натурных измерений.

Предложенный подход представляется перспективным для прогнозирования и предупреждения рисков возникновения аномально сильных ВЦВ на основании комплексного использования долговременных временных рядов информационных продуктов, формируемых на основе спутниковых данных. Этот подход может применяться в качестве инструмента для исследования условий возникновения таких аномальных явлений как интенсивные ВЦВ, с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Исследование выполнено в рамках государственно задания FNEE-2024-0002.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson D. M. Toxic algal blooms and red tides: A global perspective. Elsevier, 1989, 11–16.
2. Konovalova G. V. Red Tides in the Far Eastern Seas of Russia and Adjacent Aquatic Areas of the Pacific Ocean (A Review) // *Algologiya*. 1992. 2. 87–93.
3. Trainer V. L., Moore S. K., Hallegraeff G. M., Kudela R. M., Clément A., Mardones J. I., Cochlan W. P. Pelagic harmful algal blooms and climate change: Lessons from nature's experiments with extremes // *Harmful Algae*. 2020. 91. 101591. doi:10.1016/J.HAL.2019.03.009.
4. Díaz P., Alvarez G., Varela D., Santos I. E., Diaz M., Molinet C., Seguel M., Aguilera B. A., Guzmán L., Uribe E., Rengel J., Hernández C., Segura C., Figueroa R. Impacts of harmful algal blooms on the aquaculture industry: Chile as a case study // *Perspectives in Phycology*. 2019. 6. 39–50. doi:10.1127/pip/2019/0081.

5. Бондур В. Г., Замшин В. В., Чверткова О. И. Исследование из космоса экологического происшествия у полуострова Камчатка в сентябре-октябре 2020 г., связанного с красным приливом // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. 2021. Т. 497. № 1. С. 83–90. <https://doi.org/10.31857/S2686739721030014>.
6. Orlova T. Y., Aleksanin A. I., Lepskaya E. V., Efimova K. V., Selina M. S., Morozova T. V., Stonik I. V., Kachur V. A., Karpenko A. A., Vinnikov K. A., Adrianov A. V., Iwataki M. A massive bloom of Karenia species (Dinophyceae) off the Kamchatka coast, Russia, in the fall of 2020 // Harmful Algae. 2022. 120. 102337. doi:10.1016/j.hal.2022.102337.
7. Бондур В. Г., Замшин В. В., Чверткова О. И., Матросова Е. Р., Ходаева В. Н. Анализ причин экологического происшествия на Камчатке осенью 2020 г., связанного с красным приливом, на основании космических данных // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 3. С. 3–18. <https://doi.org/10.31857/S020596142103009X>.
8. Sakamoto S., Lim W.A., Lu D., Dai X., Orlova T., Iwataki M. Harmful algal blooms and associated fisheries damage in East Asia: Current status and trends in China, Japan, Korea and Russia // Harmful Algae. 2021. 102. 101787. doi:10.1016/j.hal.2020.101787.
9. Kuroda H., Taniuchi Y., Watanabe T., Azumaya T., Hasegawa N. Distribution of Harmful Algae (Karenia spp.) in October 2021 Off Southeast Hokkaido, Japan // Frontiers in Marine Science. 2022. 9. doi:10.3389/fmars.2022.841364.
10. Бондур В. Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
11. Bondur V., Chvertkova O., Zamshin V. Studying Conditions of Intense Harmful Algal Blooms Based on Long-Term Satellite Data // Remote Sensing. 2023. V. 15. № 22. P. 5308. <https://doi.org/10.3390/rs15225308>.
12. Shimada H., Sakamoto S., Yamaguchi M., Imai I. First record of two warm-water HAB species Chattonella marina (Raphidophyceae) and Cochlodinium polykrikoides (Dinophyceae) on the west coast of Hokkaido, northern Japan in summer 2014 // Regional Studies in Marine Science. 2016. 7. doi: 10.1016/j.rsma.2016.05.010.
13. Mardones J. Screening of Chilean fish-killing microalgae using a gill cell-based assay // Latin American Journal of Aquatic Research. 2020. 48. 329–335. doi:10.3856/vol48-issue2-fulltext-2400.

ДИНАМИКА МНОГОЛЕТНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОРСКИХ ЗАХОРОНЕНИЙ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В КАРСКОМ МОРЕ

И. М. Анисимов¹, канд. техн. наук, В. О. Муравьев^{1,2},
Н. А. Римский-Корсаков^{1,3}, д-р техн. наук

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

THE DYNAMICS OF LONG-TERM RESEARCH ON RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL IN THE KARA SEA

I. M. Anisimov¹, Ph.D., V. O. Muravya^{1,2},
N. A. Rimsky-Korsakov¹, Dr. Sc.

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Работа посвящена анализу многолетних исследований морских захоронений радиоактивных отходов. Описана методика поиска, идентификации, уточнения координат и наблюдений подводных потенциально опасных объектов в Карском море и заливах архипелага Новая Земля, с использованием оборудования, подобранным оптимальным путем.

The given study is focused on analyzing long-term research on marine disposal of radioactive waste and describes methods of searching, identifying and specifying the coordinates of potentially hazardous underwater facilities, as well as observing and researching the environment in the Kara Sea and the bays of the Novaya Zemlya archipelago, using equipment selected through trial and error.

В Карском море, вследствие утилизации радиоактивных отходов (РАО) было затоплено ~17000 контейнеров и различных конструкций реакторов, т. н. твёрдые радиоактивные отходы, атомные реакторы, в том числе с невыгруженными активными зонами — четыре реакторных отсека и экранная сборка атомного ледокола «Ленин», атомная подводная лодка (АПЛ) К-27 [1]. Первые поисковые работы с детальными исследованиями радиоактивного загрязнения морской среды в районах захоронения РАО были проведены в российско-норвежских экспедициях 1992–94 гг. В этот же период были выявлены несоответствия в данных о местах затопления, что, скорее всего, связано с несовершенством навигационного оборудования того времени [2]. Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН проводит систематическую экспедиционную работу в морях полярной зоны. За период с 2004 по 2020 гг. было проведено десять экологических экспедиций, по результатам которых было обнаружено и исследовано порядка 45% захоронений. С 2021 г. совместно с Национальным Исследовательским центром (НИЦ) «Курчатовский институт» и МЧС России были проведены три комплексных экспедиции в Карское море исключительно с целью поиска и исследования затопленных потенциально опасных объектов. В рамках этих работ были уточнены координаты и идентифицированы около 60% от всех затопленных объектов в Карском море.

Захоронения РАО располагаются на различных глубинах, что требует применения разнообразных методик для их поиска и исследования. Глубина, на которой находятся эти объекты, может варьироваться от мелководья (например, в заливах архипелага Новая Земля) до значительных глубин (например, Новоземельская впадина, которая име-

ет среднюю глубину 350 м), что непосредственно влияет на выбор оборудования и технологий, используемых в экспедициях. Стоит отметить, что в зарубежной практике радиоактивные отходы затапливали на глубинах свыше 1000 м, зачастую — более 3000 м, что исключало необходимость дальнейшего мониторинга в связи с уверенностью в безопасности таких операций [3, 4]. Тем не менее, благодаря работе Меркушова Н. С. [5] были учтены технологии и подходы, используемые зарубежными специалистами при проведении подобных работ, что позволило расширить методологические основы исследования.

Методика поиска и исследования подводных радиационно опасных затопленных объектов включают гидролокационную съёмку, визуальный осмотр с использованием подводных аппаратов и диагностику радиационной обстановки при помощи гамма-спектрометров. Такая последовательность действий позволяет комплексно исследовать захоронения РАО и оценить их состояние. Более подробно каждый этап исследования описан в работе [6].

Технология работы основана на многолетнем опыте целенаправленных наблюдений и радиационных измерений в заливах Новой Земли. Исследования проводились сотрудниками Института океанологии имени П. П. Ширшова РАН в сотрудничестве с коллегами из НИЦ КИ, Центра подводных исследований Русского географического общества (ЦПИ РГО) и Центра по проведению спасательных операций особого риска (ЦСООР) «Лидер» МЧС России. В процессе работы использовались гидролокаторы бокового обзора (ГБО) «Мезоскан-Т», «Микросаунд» и «YellowFin» [7], а также телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) мини-класса «СуперГНОМ» и «РБ-300» при погружениях с борта судового катера, а также ТНПА осмотрового класса «SeaEye Falcon» и «Argus Mini System» при погружениях с борта научно-исследовательского судна [8]. Детальный поиск подводных объектов и маршрутная видеосъёмка велась с использованием буксируемого необитаемого подводного аппарата (БНПА) «Видеомодуль» [9]. Радиационные измерения велись с помощью гамма-спектрометров типа РЭМ, разработанных в НИЦ КИ, которые устанавливались на ТНПА [10].

По результатам комплексных экспедиций, организованных Институтом океанологии им. П. П. Ширшова РАН совместно с НИЦ «Курчатовский институт» и МЧС России были проведены исследования, по результатам которых на рис. 1 наглядно продемонстрировано повышение эффективности исследования, связанное с усовершенствованием методов работы. Представлены результаты проведения работ на момент 2004–2015 гг.

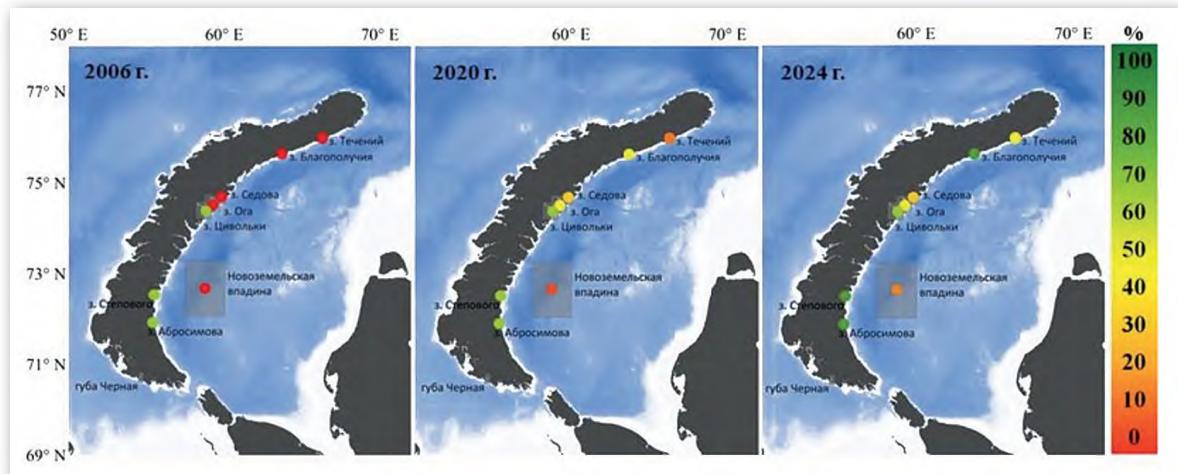


Рис. 1. Динамика многолетних исследований затопленных потенциально опасных объектов в Карском море в процентном соотношении

(работы проводились МЧС России), 2016–2020 гг. (экологические экспедиции ИО РАН), 2021–2024 гг. (совместные целенаправленные экспедиции ИО РАН и НИЦ КИ). При подсчете процента исследованности каждого района учитывалось проведение каждого этапа, описанного в текущей работе. Таким образом, стопроцентная исследованность означает, что в районе найдены и картированы все затопленные объекты, при помощи ГБО, проведены визуальный осмотр с целью идентификации и целенаправленные измерения радиоактивности гамма-спектрометром.

Анализируя полученный процент исследованности каждого района в отдельности и комплексно в Карском море и в заливах архипелага Новая Земля, можно сделать вывод, что описанная выше технология внесла большой вклад в изученность захоронений РАО. На момент начала разработки метода (2006 г.) общий процент найденных, идентифицированных и исследованных объектов составлял 25%. Технология, описанная в [6], отрабатывалась в рамках экспедиций «Экосистемы морей Сибирской Арктики» с 2007 по 2020 гг. и в совместных экспедициях с МЧС России, что привело к общему результату — 45% найденных, идентифицированных и исследованных объектов. С 2021 г. совместно с Национальным Исследовательским центром (НИЦ) «Курчатовский институт» и МЧС России были проведены три комплексные экспедиции в Карское море исключительно с целью поиска и исследования захоронений РАО. В рамках этих работ общий процент исследованности удалось повысить до 58,6% от всех затопленных объектов в Карском море.

Дальнейшее повышение эффективности проводимых исследований существенно ограничивается отсутствием разрешений на осуществление научной деятельности в ряде заливов, таких как Абросимова, Цивольки, Ога и Седова в течение последних нескольких лет. Это обстоятельство приводит к невозможности проведения поиска оставшихся ненайденных затопленных объектов, а также мониторинга состояния ранее обнаруженных. Помимо этого, в некоторых районах возникают дополнительные препятствия природного характера, такие как приливные течения или повышенная мутность из-за стока реки [11], что требует корректировки методики и учета особенностей каждого региона. Проведение дополнительного феноменологического анализа района позволит повысить эффективность проводимых исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0024). Участие в экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш» профинансирано из средств проекта Российского научного фонда № 23-17-00156.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саркисов А.А., Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Никитин В.С. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей. М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2015. 699 с.: ил., карт. ISBN978-5-9907220-0-2.
2. Никитин А.И. Натурные исследования последствий сброса и захоронения радиоактивных отходов в моря северного и дальневосточного регионов Российской Федерации: Дисс. Институт глобального климата и экологии Российской академии наук и Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2009.
3. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. Радиоэкологические последствия затопления радиоактивных отходов в морях, омывающих Россию («Белая книга-2000»). М.: ИздАТ, 2005.
4. Inventory of Radioactive Material Entering the Marine Environment: Sea Disposal of Radioactive Waste / IAEA. [Р. 1.], 1991. 76 р. (IAEA-TECDOC-588).
5. Меркушов Н.С. Состояние и направления развития технических средств и методов океанографических исследований в интересах ВМС (по материалам зарубежной печати). СПб.: ГУНиО МО, 2001.

6. *Муравья В. О., Анисимов И. М.* Технология исследований подводных объектов и ландшафтов в Карском море // Океанологические исследования. 2025. № 53 (3). С. 190–204.
7. *Римский-Корсаков Н. А.* Технология исследования дна акваторий и подводных объектов гидролокационными методами: Дис. док. техн. наук (25.00.28). М.: ИО РАН, 2011.
8. *Муравья В. О., Анисимов И. М., Лесин А. В., Римский-Корсаков Н. А.* Технология исследований и наблюдений поверхности дна акваторий и подводных потенциально опасных объектов с помощью телекоммуникационных необитаемых подводных аппаратов // Комплексные исследования Мирового океана: Материалы VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых. Владивосток, 13–17 мая 2024 г. Владивосток: Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН, 2024. С. 636–637.
9. Anisimov I. M., Zalota A. K., Lesin A. V., Muravya V. O. Aspects of the towed underwater vehicle «videomodule»: utilization for surveying underwater objects and benthic fauna // Oceanology. 2023. 63 (5), 733–743.
10. Казеннов А. Ю., Кикнадзе О. Е., Калмыков С. А., Никитин А. О. Применение подводных высокочувствительных гамма-спектрометров при проведении радиационного мониторинга состояния подводных ядерно и радиационно опасных объектов // Современные методы и средства океанологических исследований: Материалы XVIII международной научно-технической конференции. М.: ИО РАН, 2023. Т. 1. С. 172–176.
11. *Муравья В. О., Недоспасов А. А., Анисимов И. М.* Учет гидрологических особенностей акватории при исследовании ППОО // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2025): Материалы XIX Международной научно-технической конференции. Том II. М.: ИО РАН, 2025. С. 16–19.

ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БЕЗЛЁДНОГО ПЕРИОДА В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ БЕРЕГОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

П. А. Шабанов¹, канд. геогр. наук

¹ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

ICE-FREE PERIOD DURATION CHANGES IN THE EAST-SIBERIAN SEA USING COASTAL OBSERVATIONS

P. A. Shabanov¹, Ph.D.

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Естественным следствием наблюдаемого сокращения площади морского льда в тёплый период в Восточно-Сибирском море в XXI в. является увеличение здесь продолжительности безлёдного периода (БЛП). Рассматриваются изменения характеристик БЛП за 1997–2019 гг., полученные по данным береговых наблюдений на пяти станциях Росгидромета в Восточно-Сибирском море. Статистически значимых изменений продолжительности БЛП не обнаружено. При этом на 4 из 5 рассмотренных станций отмечается статистически значимое смещение дат окончания БЛП на более поздний срок со средней скоростью +7–9 сут/10 лет.

A natural consequence of the reduction in sea ice area during the warm period in the East Siberian Sea in the 21st century is the increase in the duration of the ice-free period (IFP). Changes in the characteristics of IFP for the years 1997–2019 were analyzed based on coastal observations at five stations of the Russian Hydrometeorological Service in the East Siberian Sea. No statistically significant changes were found in the duration of IFP. However, at four of the five stations, there was a statistically significant shift in the end date of IFP to a later date, with an average rate of +7–9 days per decade.

Характерное для начала XXI в. ускоренное сокращение площади морского льда в Северном Ледовитом океане [1, 2] наблюдается в том числе и в Восточно-Сибирском море [3, 4]. С конца 80-х гг. ХХ в. ледовые условия Восточно-Сибирского моря существенно изменились, стали чаще наблюдаться легкие ледовые условия. В 1990 г., впервые с 1946 г., в летний период акватория моря практически полностью очистилась от дрейфующих льдов [5]. За первые 15 лет XXI в. по сравнению с ХХ в. уменьшение средних значений площадей ледяных массивов (на середину месяца) в Восточно-Сибирском море в августе-сентябре составило 14–24% для Новосибирского массива и 27–38% для Айонского массива [6].

Наблюдаемое сокращение площади морского льда в тёплый период года естественным образом проявляется в увеличении продолжительности безлёдного периода (БЛП) [7–9]. Значимые изменения продолжительности безлёдного периода существенно влияют на функционирование береговой инфраструктуры, навигацию и прибрежные экосистемы [7, 10–16]. Также в последние десятилетия уменьшение ледяных массивов Восточно-Сибирского моря стало происходить более интенсивно, что напрямую влияет на увеличение продолжительности безлёдного периода [5].

Несмотря на обширный накопленный материал об изменениях характеристик ледовитости в Восточном-Сибирском море [6, 17, 18], характер наблюдаемых изменений морского ледяного покрова в конце второго — начале третьего десятилетия XXI в. указывает на необходимость мониторинга на региональном уровне. В дополнение к существующим индикаторам наблюдаемых климатических изменений состояния морского ледяного покрова предлагается проанализировать характеристики БЛП: даты начала, даты окончания и продолжительность БЛП [19].

Изменения ледового режима в прибрежной зоне существенно отличаются от изменений, наблюдаемых в открытой акватории моря. Наиболее подходящим источником для оценки изменений в прибрежной зоне арктических морей России являются данные береговых наблюдений на сети гидрометеорологических станций Росгидромета [20].

Методы и данные. На основе данных береговых наблюдений за сроками ледовых явлений проанализированы изменения продолжительности безледного периода (БЛП) за период 1997–2019 гг. для пяти гидрометеорологических станций в Восточно-Сибирском море: «Валькаркай», «Амбарчик», «Айон», «Рай-Чуя», «Певек», (рис. 1). Были использованы данные о сроках наступления ледовых явлений на гидрометеорологических станциях за период 1996–2020 гг., опубликованные в рамках проекта «Мировой Центр Данных — Морской Лёд» под управлением Арктического и Антарктического научно-исследовательского института, проанализирован массив «d0009» с сайта проекта: <http://wdc.aari.ru/datasets/>.

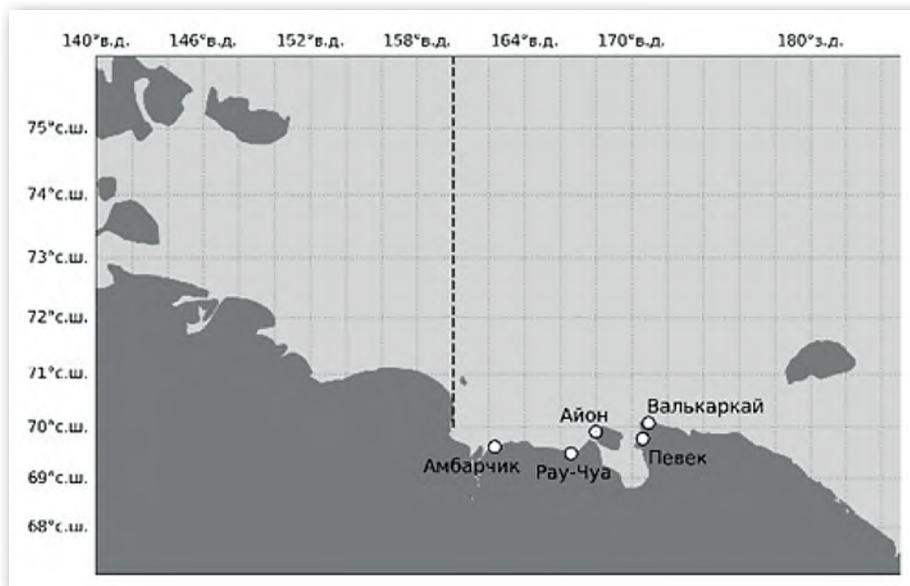


Рис. 1. Географическое положение проанализированных в работе станций наблюдений за сроками ледовых явлений в Восточно-Сибирском море

В качестве дат начала БЛП были использованы даты очищения акватории, а окончания БЛП — даты устойчивого ледообразования. Продолжительность БЛП определялась как разность между датами окончания и начала периода, выраженная в днях.

Скорости изменений характеристик БЛП оценивались по величине коэффициента линейного тренда, полученного методом наименьших квадратов из модуля научных вычислений `scipy.stats.linregress` языка программирования `python`. Статистическая значимость линейных трендов оценивалась с помощью *t*-теста Стьюдента. Тенденция признавалась статистически значимой, если она удовлетворяла критерию значимости на уровне 95%. Далее, если не указано иное, статистическая значимость результатов расчетов и оценок признается на уровне 95%.

Изменения характеристик БЛП по данным береговых наблюдений. По данным береговых наблюдений на всех рассмотренных станциях статически значимых изменений продолжительности БЛП за период 1997–2019 гг. не зафиксировано (таблица 1). При этом все оцененные скорости изменений продолжительности БЛП положительные. Скорость изменений продолжительности БЛП на станции «Амбарчик» составляет +3 сут/10 лет, на станциях «Айон» (рис. 2), «Рай-Чуя», «Певек» и «Валькаркай» оцениваются от +7 сут/10 лет до +9 сут/10 лет.

Таблица 1

Скорости изменений за период 1997–2019 гг. характеристик БЛП по данным наблюдений на станциях в Восточно-Сибирском море

Индекс ВМО	Название	Дат начала БЛП, сут/10 лет	Дат окончания БЛП, сут/10 лет	Продолжительности БЛП, сут/10 лет
21978	Валькаркай	−5,6	9,5	8,4
25034	Амбарчик	−1,9	1,7	2,9
25042	Айон	−6,3	9,1	6,6
25044	Рай-Чуя	−2,8	9,5	8,8
25051	Певек	−3,6	7,0	8,2

Жирным выделены статистически значимые изменения

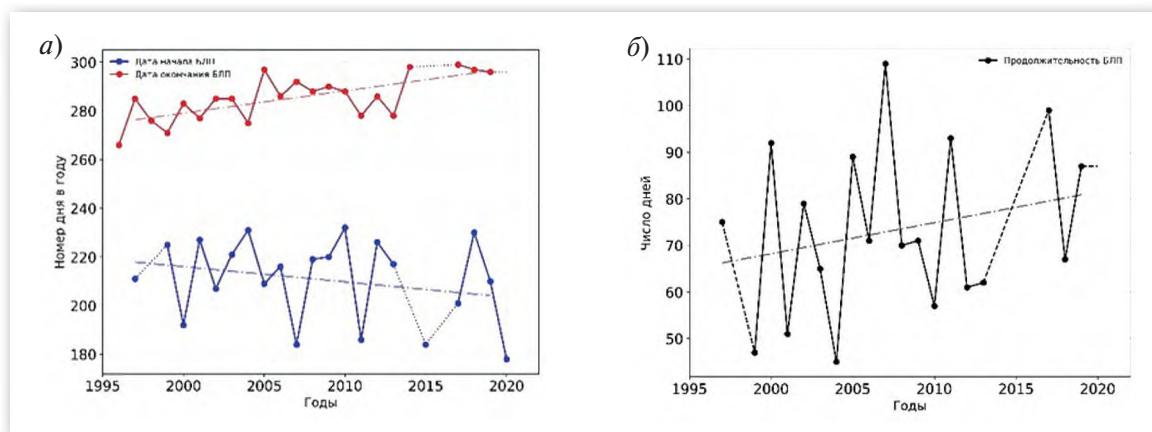


Рис. 2. Межгодовые изменения характеристик БЛП по данным береговых наблюдений на станции «Айон»:

а — даты начала БЛП (номер дня в году, синий) и даты окончания БЛП (номер дня в году, красный);
б — продолжительность БЛП (сут, чёрный)

При этом на всех станциях, кроме станции «Амбарчик», отмечаются статистически значимые положительные изменения дат окончания БЛП. Скорости изменений дат окончания БЛП варьируются от +7 сут/10 лет на станции «Певек» до +9 на остальных станциях.

Для дат начала БЛП статистически значимых изменений не обнаружено. При этом все скорости изменений дат начала БЛП отрицательные, т. е. указывают на смещение на более ранние сроки. Скорость изменений дат начала БЛП на станции «Амбарчик» составляет −2 сут/10 лет, на станции «Рай-Чуя» −3 сут/10 лет, «Певек» −4 сут/10 лет, а на «Валькаркай» и «Айон» −6 сут/10 лет.

Заключение и обсуждение. По данным береговых наблюдений за период 1997–2019 гг. не наблюдается статистически значимого увеличения продолжительности БЛП в прибрежной зоне восточной части Восточно-Сибирского моря. При этом зафиксированы статистически значимые смещения дат окончания БЛП на более поздние сроки. Средняя скорость таких изменений +8 сут/10 лет. Однако на фоне статистически незначимых изменений дат начала БЛП, вклада изменений дат окончания БЛП в итоговую продолжительность БЛП оказывается недостаточно, чтобы зафиксировать статистически значимое увеличение продолжительности БЛП.

Хотя доступный период наблюдений за характеристиками БЛП охватывает измерения с 1997 по 2019 гг., фактическая доля исправных данных варьировалась от 70% на стан-

ции «Валькаркай» до 87% на станции «Певек». Практически отсутствовали необходимые данные в период 2014–2016 гг. В результате расчёт скоростей изменений характеристик БЛП по итоговым времененным рядам оказался чувствителен к изменению даже одного значения, особенно в начале и в конце периода наблюдений. При этом, если бы доступный период наблюдений захватывал бы 1980-е гг., тогда изменения продолжительности БЛП ожидали бы статистически значимыми. Т.е. статистически значимые изменения продолжительности БЛП не были обнаружены, т. к. выбранный период короткий и характеризуется в целом более мягкими ледовыми условиями.

Актуализация архивов и первичная обработка данных береговых наблюдений в Восточно-Сибирском море выполнены в рамках государственного задания ИО РАН № FMWE-2024-0017.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Stroeve J., Notz D.* Changing state of Arctic sea ice across all seasons // Environmental Research Letters. 2018. Vol. 13. № 10. P. 103001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56>
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>
3. *Onarheim I. H., Eldevik T., Smedsrud L. H., Stroeve J. C.* Seasonal and Regional Manifestation of Arctic Sea Ice Loss // Journal of Climate. 2018. Vol. 31. № 12. P. 4917–4932. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0427.1>.
4. *Макаров А. С., Миронов Е. У., Иванов В. В., Юлин А. В.* Ледовые условия морей российской Арктики в связи с происходящими климатическими изменениями и особенности эволюции ледяного покрова в 2021 году // Океанология. 2022. Т. 62. № 6. С. 845–856. DOI: 10.31857/S0030157422050124.
5. *Юлин А. В., Шаратунова М. В., Павлова Е. А., Иванов В. В.* Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 3. С. 229–240. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240.
6. *Думанская И. О.* Ледовые условия морей азиатской части России. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
7. *Сочнев О. Я., Корнишин К. А., Ефимов Я. О., Миронов Е. У., Порубаев В. С.* Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 239–254. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-239-254.
8. *Bliss A. C., Steele M., Peng G., Meier W. N., Dickinson S.* Regional variability of Arctic sea ice seasonal change climate indicators from a passive microwave climate data record // Environmental Research Letters. 2019. Vol. 14. № 4. P. 045003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb84>.
9. *Peng G., Steele M., Bliss A., Meier W., Dickinson S.* Temporal Means and Variability of Arctic Sea Ice Melt and Freeze Season Climate Indicators Using a Satellite Climate Data Record // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. № 9. P. 1328. <https://doi.org/10.3390/rs10091328>.
10. *Павлидис Ю. А., Леонтьев И. О., Никифоров С. Л., Рахольд Ф., Григорьев М. Н., Разумов С. Р., Васильев А. А.* Генеральная прогнозная схема развития прибрежной зоны арктических морей Евразии в 21 веке // Океанология. 2007. Т. 47. № 1. С. 129–140.
11. *Холопцев А. В., Подпорин С. А.* Перспективы безледокольной навигации судов класса Arc7 в районе Новосибирских островов в зимний период // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2019. Т. 11. № 5. С. 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
12. *Огородов С. А., Шабанова Н. Н., Кессель А. С., Баранская А. В., Разумов С. О.* Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей Российской Арктики // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 1. С. 26–42.
13. *Yu M., Lu P., Li Z., Li Z., Wang Q., Cao X., Chen X.* Sea ice conditions and navigability through the Northeast Passage in the past 40 years based on remote-sensing data // International Journal of Digital Earth. 2021. Vol. 14. № 5. P. 555–574. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1860144>.
14. *Irrgang A. M., Bendixen M., Farquharson L. M., Baranskaya A. V., Erikson L. H., Gibbs A. E., Ogorodov S. A., Overduin P. P., Lantuit H., Grigoriev M. N., Jones B. M.* Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. № 1. P. 39–54. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00232-1>.

15. *Kazhukalo G., Novikova A., Shabanova N., Drugov M., Myslenkov S., Shabanov P., Belova N., Ogorodov S.* Coastal Dynamics at Kharasavey Key Site, Kara Sea, Based on Remote Sensing Data // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. № 17. P. 4199. <https://doi.org/10.3390/rs15174199>.
16. *Khon V.C., Mokhov I.I., Latif M., Semenov V.A., Park W.* Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the twenty-first century // *Climatic Change*. 2010. Vol. 100. № 3–4. P. 757–768. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9683-2>.
17. *Карелин И.Д., Карклин В.П.* Припай и заприпайные полыньи арктических морей Сибирского шельфа в конце XX — начале XXI века. СПб.: ААНИИ, 2012. 180 с.
18. *Думанская И.О.* Некоторые тенденции в изменении ледовых характеристик арктических морей в XXI веке // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 362. С. 129–154.
19. *Shabanov P.A., Shabanova N.N.* Ice-free period detection method in the Arctic coastal zone // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. Vol. 20. № 6. P. 1–10. <https://doi.org/10.2205/2020ES000725>.
20. *Комчатов В.Ф., Лучков В.П.* Вековая Морская Береговая Гидрометеорологическая Сеть — Основа Изучения Гидрологического Режима Шельфовой Зоны Морей РФ и Обеспечения Гидрометеорологической Безопасности // Труды Государственного Океанографического Института. 2011. № 213. С. 5–14.

3.3. Риски на водных объектах суши

РИСКИ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ ВОДНЫХ СИСТЕМ СЕВЕРА ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТА И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ: НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Н. Н. Филатов^{1,2}, чл.-корр. РАН

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Санкт-Петербургский филиал,
Санкт-Петербург

²Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск

RISKS ASSOCIATED WITH CHANGES IN THE NORTH'S WATER SYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGES AND ECONOMIC ACTIVITIES: PROBLEMS AND SOLUTIONS

N. N. Filatov^{1,2}, Corr. Memb. RAS

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Branch,
St. Petersburg

²Northern Water Problems Institute Karelian Research Center,
Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk

Рассмотрены проблемы и риски, связанные с изменением водных экосистем Севера Европейской территории России под влиянием изменений климата и хозяйственной деятельности. Актуальными глобальными и региональными «водными» проблемами являются эвтрофирование, токсическое загрязнение вод, влияние форелевых хозяйств, уменьшение эндемичных видов, сокращение биоразнообразия, распространение вселенцев, микропастика, слабое использование подземных вод для водоснабжения, неудовлетворительное состояние гидротехнических сооружений и неэффективное управление ресурсами водоемов.

The problems and risks associated with changes in aquatic ecosystems in the northern European part of Russia under the influence of climate change and economic activity are examined. Current global and regional water issues include eutrophication, deteriorating water quality, the impact of trout farms, the decline of endemic species, biodiversity loss, invasive species, microparticles, poor use of groundwater for water supply, the state of hydraulic structures, and ineffective management of water resources.

Север европейской территории России (ЕТР) — один из самых богатых водными объектами (озерно-речные системы, подземные воды, Белое море) и обеспеченных водными ресурсами регионов России, испытывает большую нагрузку на водные объекты от антропогенной деятельности: в особенности от воздействия предприятий, выпускающих водоемную продукцию (целлюлозно-бумажная промышленность, производство алюминия и железорудных окатышей), гидроэнергетики, водного транспорта. Заметное влияние на экосистемы оказывают изменения климата. Среди наиболее важных проблем региона (Республик Карелия, Коми, а также Архангельской, Ленинградской, Мурманской, Вологодской областей) рассматриваются риски, связанные с [1, 2]:

- возможным изменением трофического статуса водоемов, ухудшением качества вод при антропогенном эвтрофировании, закислении, токсическом загрязнении водных объектов;
- потеплением климата;

- изменением экосистем под влиянием инвазивных видов, форелеводческих хозяйств, которые в последние 10 лет дают более 70% товарной форели России, но оказывают негативное влияние на пресноводные водоемы;
- неудовлетворительным состоянием гидротехнических сооружений (ГТС) и большим риском аварий и чрезвычайных ситуаций;
- обеспечением населения Севера ЕТР качественной питьевой водой.

В связи с развитием деятельности на СМП, освоением Арктической зоны РФ требуется создание, модернизация по трассе «Балтийское море — Нева — Ладога — Онего — ББК — Белое море» (Беломорско-Балтийская водная система — ББВС) портовых сооружений, ремонтных баз складских помещений и других объектов. Рост эксплуатации этой водной системы может быть также обусловлен необходимостью переориентации транспортных потоков из Балтики на Север в Арктику через ББВС в связи с geopolитическими угрозами стран НАТО. Поэтому также важна оценка последствий возможных изменений состояния водных объектов Беломорско-Балтийской водной системы под воздействием увеличения грузопотоков. Перераспределение путей доставки грузов может оказать влияние на экологическое состояние природных объектов, лежащих в зонах прохождения существующих и создаваемых транспортных коридоров, и прежде всего на состояние находящихся там водных объектов за счет дополнительного поступления биогенной нагрузки, водопотребления и водопользования [3]. Изменения гидрологического режима и элементов водного баланса также приведет к необходимости коррекции водохозяйственной деятельности в регионе, что повлечет, в свою очередь, определенные изменения в управлении водохозяйственными системами и отраслями экономики, базирующимися на использовании водных ресурсов (водоемные производства, гидроэнергетика, промышленное и коммунальное водоснабжение и др.).

Расширение деятельности ББВС для решения стратегических задач России, возможно, потребует вернуться к разработанным ранее проектам расширения трассы ББК [4], с необходимостью обновления имеющихся заделов и разработки новых технических решений с оценкой влияния модернизированной системы ББК на водные системы. Это в свою очередь потребует регулирования уровня воды Онежского и Ладожского озера и возможного подъема уровня воды в устье Невы и создание там ГТС. Поэтому важно оценить допустимую антропогенную нагрузку на систему, разработать адресные предложения для субъектов Российской Федерации по снижению рисков социально-экономических и экологических ущербов. С учетом необходимости решения предстоящих задач государственного уровня важно активизировать научную деятельность при проведении мультидисциплинарных экологических исследований ББВС, включающих проведение фундаментальных и прикладных исследований разнотипных водных экосистем и их водосборов Северо-Западного федерального округа и смежных регионов. К числу актуальных и перспективных направлений исследований относятся вопросы: разработки методов оценки состояния и прогноза изменений водных экосистем Севера; определения допустимых антропогенных нагрузок на пресноводную гидросферу, ассимиляционного потенциала экосистем водоемов Севера ЕТР; анализа природных и социально-экономических ресурсов развития территориальных комплексов; разработки систем поддержки принятия управлений решений.

При решении фундаментальных и прикладных задач региона важным является мониторинг качества вод. Отмечается, что в последние годы неэффективно реализуется мониторинг водных объектов [5]. Схема ведения мониторинга должна учитывать бассейновый и региональный подходы и создаваться на единой информационной основе для ведомств разной подчиненности. На базе результатов мониторинга с использовани-

ем математических моделей должен осуществляться диагноз и прогноз состояния и изменений водных систем Севера ЕТР.

В связи с продолжающимся поступлением биогенных веществ как от точечных, так и распределенных источников в озера, и, в особенности, в крупнейшие озера Севера ЕТР Ладожское и Онежское (экосистемы которых медленно восстанавливаются после резкого уменьшения антропогенной нагрузки) в условиях заметного потепления климата в регионе за последние 30 лет имеется риск эвтрофирования экосистем. Поэтому требуется оценка допустимой нагрузки, ассимиляционного потенциала их экосистем для сохранения их трофического статуса. Для этих озер были получены такие оценки, которые могут быть использованы для принятия управлеченческих решений [1].

При обилии водных ресурсов качество поверхностных вод водоемов Севера ЕТР не отвечает требованиям использования их без серьезной водоподготовки для питьевого водоснабжения. Сложная ситуация с обеспечением экономики региона имеется как в Карелии, так и в Мурманской и Архангельской областях. Необходимо учитывать природные особенностями поверхностных вод региона, а именно их низкую минерализацию, преобладание гидрокарбонатов и кальция в ионном составе, содержание значительных количеств органического вещества гумусовой природы. При этом щелочноземельные металлы превалируют над щелочными, что является оптимальным для существования гидробионтов. Эти природные условия в сочетании с особенностями климата региона благоприятствуют развитию аквакультуры в Карелии и Мурманской области. Но бурный рост производства форели на пресноводных озерах создает риск их эвтрофирования, что уже наблюдается в Кондопожской губе Ладожского озера и ряде других озер. Для решения проблем, связанных с ограничением размещения форелевых хозяйств на пресных озерах, необходимо оценить возможности размещением этих хозяйств на Белом море, как это делается в Скандинавских странах.

Улучшение положения с водообеспечением промышленности, сельского хозяйства, населения может быть достигнуто либо переходом на использование исходной воды более высокого качества, в частности, там, где это возможно, из подземных источников, либо значительным усовершенствованием процессов водоподготовки и, прежде всего, сокращением первичного хлорирования, как это сделано в городах Санкт-Петербурге и Петрозаводске. Показаны различия в подходах использования поверхностных и подземных вод для экономики разных регионов Севера ЕТР. Рассматриваются проблемы обеспечения населения чистой питьевой водой и риски, связанные с использованием недостаточно защищенных вод из поверхностных источников, для обеззараживания которых требуется хлорирование. Однако хлорирование высокочастных, богатых органикой вод региона приводит к образованию хлорорганических соединений, дающих мутагенный эффект, который приводит к риску заболевания населения. Для улучшения обеспечения населения чистой, безопасной для здоровья водой требуется использование подземных, более защищенных от загрязнения вод, как это практикуется в соседней Финляндии, имеющей сходные природные условия с Карелией и Мурманской областью. В Финляндии используется для водоснабжения более чем 50% из подземных источников, а в Республике Карелии для питьевого водоснабжения используется всего 3%, что приводит к риску повышенного уровня заболеваний. При этом в Карелии найдены источники подземных вод, и документация по ним была передана руководству региона, но из-за отсутствия инвестиций источники до сих пор не освоены.

Для решения водных проблем региона был разработан и реализован на примере Онежского озера и водосбора интегрированный подход для диагноза и прогноза изменения системы на основе применения разработанной ИАС [1]. Требуется дальнейшее

совершенного интегрированного подхода для т. н. адаптивного управления, предложенного для Великих американских озер для борьбы с эвтрофированием [6].

Эти меры будут способствовать принятию управленческих решений по рациональному использованию ресурсов, сохранению и восстановлению экосистем озер России на научной основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Филатов Н.Н., Дружинин П.В., Исаев А.В., Кондратьев С.А. и др.* Обоснование возможной биогенной нагрузки на Онежское озеро и прогностические оценки изменения его экосистемы при разных климатических и социально-экономических сценариях // Водные ресурсы. 2025. Т. 52. № 4. С. 724–737.
2. *Филатов Н.Н., Бахмет О.Н., Дружинин П.В., Меншуткин В.В., Назарова Л. Е.* Оценка состояния и изменения эколого-социо-экономической системы Белого моря и водосбора // Вестник РГФИ. 2022. № 2 (114). С. 109–118.
3. *Литвиненко А. В., Литвинова И. А., Богданова М. С., Филатов Н. Н.* Водохозяйственный комплекс Карельской части Арктической зоны Российской Федерации: современное состояние и динамика // Арктика: Экология, экономика. 2023. Т. 13. № 2. С. 280–296.
4. *Филин П.А.* Забытая история Большого Беломорстроя. Ленинград как базовый порт Северного морского пути // Полярные чтения. 2025 (в печати).
5. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С. А. Кондратьева. М.: РАН, 2021. 637 с.
6. *Peterson J. T., Freeman M. C.* Integrating modeling, monitoring, and management to reduce critical uncertainties in water resource decision making // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 183. Part 2. Pp. 361–370.

ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ЦЕЛЕПОЛАГАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗА АЭРОТЕХНОГЕННЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ АРКТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРЕСНЫХ ВОД

B. A. Румянцев¹, акад. РАН

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук,
Москва, Россия

AN INNOVATIVE APPROACH TO CREATING A TARGET-ORIENTED SYSTEM FOR MONITORING AERO-TECHNOLOGICAL POLLUTION OF ARCTIC SURFACE FRESHWATER

V. A. Rumyantzev¹, acad. RAS

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

Планирование хозяйственного освоения арктических регионов и всей арктической зоны должно исходить из сбалансированного подхода между поставленными целями социально-экономического, оборонного и военного развития и потребностями сохранения плохо восстанавливющейся арктической природной среды. В связи с этим крайне актуальным стал вопрос создания менее затратных и более целеполагающих систем контроля за изменением состояния окружающей среды.

Planning for the economic development of Arctic regions and the entire Arctic zone must be based on a balanced approach between the stated goals of socioeconomic, defense, and military development and the need to preserve the Arctic's poorly regenerating natural environment. Therefore, the creation of less costly and more targeted systems for monitoring environmental changes has become extremely urgent.

Планирование хозяйственного освоения арктических регионов и всей арктической зоны должно исходить из сбалансированного подхода между поставленными целями социально-экономического, оборонного и военного развития и потребностями сохранения легко ранимой и плохо восстанавливющейся арктической природной среды. Из-за слабого уровня системы мониторинга загрязнения окружающей среды Росгидромета осуществление сбалансированного подхода полностью исключено. Достаточно сказать, что при наличии в Арктической зоне свыше 2,5 миллионов дешифрированных озёр в европейской части имеется только восемь пунктов мониторинга, а в азиатской — шесть пунктов. Это свидетельствует о недостаточном знании состояния окружающей среды на этапе планирования хозяйственного освоения арктической зоны и полном отсутствии контроля за выдвинутыми директивными органами требованиями к охране природы Арктики. В связи с этим крайне актуальным стал вопрос создания менее затратных и более целеполагающих систем контроля за изменением состояния окружающей среды.

Автором было предложено создание такой целеполагающей системы контроля за воздействием аэрохимического загрязнения на состояние арктических поверхностных водных объектов. В работе [1] были рассмотрены основные методологические положения создания такой системы, и предложен вариант для случая расположения водных объектов вблизи населённых пунктов с возможностью реализации мероприятий по их

рекультивации. В работе [2] обсуждается более общий случай, когда водные объекты находятся на большом удалении от населённого пункта, и имеются сложности с их обследованием. Для этого случая была предложена технологическая платформа контроля за аэротехногенным загрязнением. Она имеет три основных блока:

- установление границ значимых воздействий на водные объекты переносимых воздушными потоками загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу промышленным предприятием;
- районирование территории с загрязнёнными водными объектами по физико-географическим параметрам, выбор реперных водных объектов и отбор из них проб воды;
- анализ проб воды с целью обнаружения нарушения водными объектами условий экологической безопасности.

Решение вопроса установления границ концентрации распространения значимых для водных объектов загрязняющих веществ может решаться на основе приближенных решений трёхмерного уравнения турбулентной диффузии. В России можно использовать для расчётов введённые в действие в 2018 г. «Методы расчётов рассеивания выбросов вредных загрязняющих веществ в атмосферном воздухе», утверждённые приказом Минприроды России [3], основанные на работах М. Е. Берлянда [4]. В зарубежных странах широкое распространение получили модификации приближённой трёхмерной гауссовой (дисперсионной) модели, предложенной Д. В. Turner [5]. В ней распространение загрязнения в доминирующем горизонтальном направлении рассчитывается по одномерному уравнению турбулентной диффузии, а по ортогональным к нему осям — по гауссову (нормальному) закону распределения вероятностей со своими дисперсиями.

Ни один из названных подходов применительно к оценке воздействия загрязняющих веществ на водные объекты ранее не использовался. Поэтому для выяснения их работоспособности необходимо проведение в одном из арктических регионов специального эксперимента на базе промышленного предприятия. Однако это требует предварительного согласования с муниципальными и региональными административными органами.

Районирование загрязнённой территории по физико-географическим характеристикам, выбор реперных водных объектов и отбор из них проб воды будет осуществляться с использованием БПЛА (беспилотные летательные аппараты). Использование дронов сегодня является очень актуальным быстро развивающимся направлением исследований с целью использования их для отбора проб воды из труднодоступных или опасных водоёмов. Богатый опыт применения летательных аппаратов для решения подобных задач представлен в работах [6–8].

В настоящее время БПЛА вертолётного типа, способных зависать над поверхностью воды и отбирать пробы, в России нет, однако нет сомнений в их появлении в ближайшей перспективе. Это будет способствовать существенному повышению уровня контроля за техногенными загрязнениями арктических водных объектов.

Анализ собранных проб воды с реперных объектов будет осуществляться с применением природоподобной биомиметической технической системы, являющейся функциональным аналогом живых организмов по их реакции на внешнее воздействие. Основной задачей при анализе будет выяснение соблюдения или нарушения на водном объекте условий экологической безопасности. Для этого в соответствии с принятым в России правовым пониманием термина экологической безопасности водного объекта для питьевого и хозяйствственно-бытового обеспечения достаточным будет использование показателя интегральной токсичности воды. Обнаружение на реперном водном объекте с помощью биомиметической технической системы токсичности воды означает, что он

является опасным для жизни людей и представителей животного и растительного мира. Это заключение переносится на все однородные с реперным водные объекты.

Для избежания возникновения чрезвычайных ситуаций, вызванных контактами коренных народов севера, перемещающихся по арктическим территориям со стадами оленей, геологоразведочных партий, воинских подразделений, экотуристов, координаты местонахождения опасных водных объектов и их водосборов необходимо будет передавать муниципальным органам власти для включения их в региональный реестр объектов накопленного экологического вреда.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Румянцев В.А.* Концептуальные и методологические подходы к организации системы контроля поверхностных вод арктической зоны Российской Федерации // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 2. С 210–221.
2. *Румянцев В.А.* Перспективы создания природоподобной технологической платформы контроля экологического состояния пресных вод Российской Арктики // Арктика: Экология и экономика. 2025. № 4. С. 72–82.
3. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе (утверждены приказом Минприроды России от 08.05.2017. № 273).
4. *Берлянд М. Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. 1975. 448 с.
5. *Turner D. B.* Workbook of Atmospheric dispersion estimates. U. S. Department of Health, Education, and Welfare, 1970–91. 84 pp.
6. *Koparan C., Koc A. B., Privette C. V., Sawyer C. B.* In situ water quality monitoring using an unmanned aerial vehicle (UAV) // System. 2018. 9 (4), 89.
7. *Koparan C., Koc A. B., Privette C. V., Sawyer C. B., Sharp J. L.* Autonomous in situ measurements of noncontaminant water quality indicators and sample collection with a UAV // Water. 2020. 12 (4), 1028.
8. *Bonacci D., Brigante R.* Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Water Sampling: A Systematic Review // Water. 2022. 14 (19), 3071.

РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В АКТИВИЗАЦИИ НАВОДНЕНИЙ, РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ЗАГРЯЗНЕНИИ РЕКИ АМУР

А. Н. Махинов¹, д-р геогр. наук,

А. Ф. Махинова¹, канд. геогр. наук, Лю Шугуан², проф.

¹Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, Россия

²Университет Тунцзи, Департамент инженерной гидравлики, Шанхай, Китай

THE ROLE OF CLIMATE CHANGE IN THE INTENSIFICATION OF FLOODS, CHANNEL PROCESSES AND POLLUTION OF THE AMUR RIVER

A. N. Makhinov¹, Dr. Sc.,

A. F. Makhinova¹, Ph.D., Liu Shuguang², Prof.

¹Institute of Water and Ecological Problems, FEB RAS, Khabarovsk, Russia

²Tongji University, Department of Hydraulic Engineering, Shanghai, China

Рассматриваются особенности формирования больших наводнений на реке Амур, обусловленных глобальными изменениями климата, и оценено их влияние на динамику разветвленных на рукава русел, размыв берегов и условия загрязнения воды одной из крупнейших рек Восточной Азии.

The article examines the features of the formation of large floods on the Amur River caused by global climate change, and assesses their impact on the dynamics of channels branching into branches, erosion of banks and conditions of water pollution in one of the largest rivers in East Asia.

С начала 2000-х гг. количество и масштабы стихийных бедствий в мире возросли примерно в пять раз, а их опасность — в девять раз [1]. Ежегодный ущерб от воздействия опасных природных процессов на территории России составляет десятки миллиардов рублей. Значительно возрос, особенно в последние годы, материальный ущерб от катастрофических наводнений и связанных с ними процессов береговой переработки, подтопления, заболачивания и водной эрозии [2]. Многие исследователи [3, 4 и др.] связывают подобные явления в различных районах планеты с глобальными климатическими изменениями, кумулятивный эффект которых приводит к преобразованию природных комплексов и их основных компонентов.

Бассейн нижнего течения реки Амур относится к территориям с проявлением специфических климатических, геоморфологических и гидрологических факторов, обусловленных его географическим положением. Динамика формирования водных ресурсов территории под влиянием изменений климата имеет региональные особенности и является весьма актуальной проблемой в связи с усилившейся неустойчивостью климатических параметров и возросшей активностью экстремально опасных природных процессов, особенно интенсивно проявляющихся в последнее десятилетие.

Для дальневосточного региона большое значение имеет оценка влияния наводнений на динамику русловых процессов и экологическое состояние реки Амур. Решение этой проблемы, несмотря на ее сложность, необходимо для проектирования и строительства гидротехнических сооружений, при разработке схем защиты населенных пунктов и хозяйственной инфраструктуры от воздействия высоких паводков, а также для совершенствования методов прогнозирования воздействия изменения климата на водный режим

рек. Подобные исследования необходимы также для обоснования стратегии управления, эффективного использования и защиты водных ресурсов от загрязнения.

В процессе исследований были использованы данные экспедиционных исследований русловых процессов в нижнем течении реки Амур на участке от г. Хабаровск до с. Бого-родское после наводнений 2013, 2019–2021 гг. Наиболее детальные работы проводились на Нижнем Амуре в окрестностях крупных городов — Хабаровска, Амурска и Комсомольска-на-Амуре, расположенных на Среднеамурской низменности, а также в среднем течении реки на выявленных ранее участках, подверженных особо интенсивным русловым преобразованиям.

Глобальное потепление климата на территории России наиболее ощутимо проявляется в высоких широтах [5]. Исследование трендов изменения среднегодовой температуры воздуха на метеорологических постах с длительными рядами наблюдений, расположенных в бассейне Нижнего Амура, также показало тенденцию к их существенному увеличению. В период с 1990 по 2024 гг. среднегодовая температура воздуха в Нижнем Приамурье увеличилась на 1,8°C, а за все время инструментальных наблюдений — на 2,0–2,2°C (рис. 1).

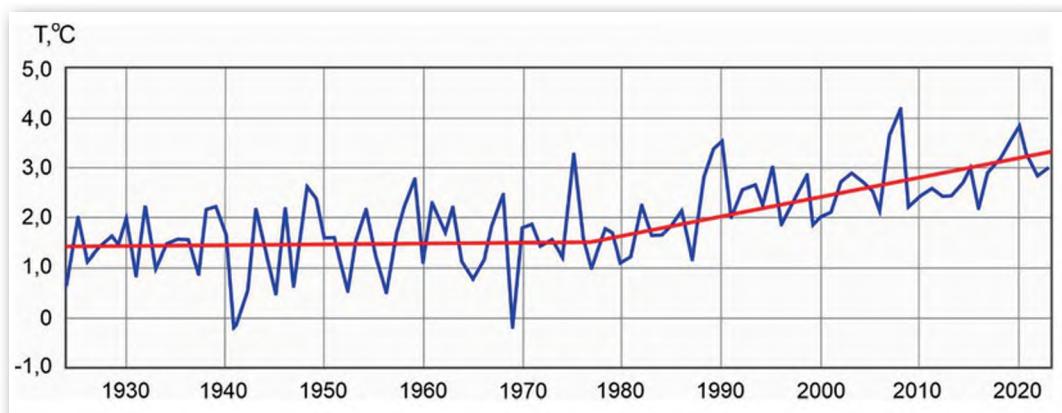


Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры воздуха за 1924–2023 гг. по метеостанции г. Хабаровск

Значительный рост температуры воздуха особенно за последние 35 лет обусловливает преобразование водного, руслового и ледового режимов реки Амур. С целью выявления изменений в сроках наступления различных ледовых явлений было выделено два периода — с 1927 по 1990 гг. и с 1991 по 2014 гг.—на трех гидрологических постах — Хабаровске, Комсомольске-на-Амуре и Николаевске-на-Амуре, имеющих наиболее длительные ряды наблюдений. В результате сравнения данных о ледовом режиме Амура за каждый период были установлены более поздние сроки начала ледостава (на 1–2 дня), более раннее начало весеннего ледохода (на 2–3 дня) и сокращение общей продолжительности ледостава (на 3–4 дня) [6].

Изменения климата отражаются в преобразовании речного стока, выражющегося, прежде всего, в увеличении частоты и величины больших наводнений [7]. Анализ данных водного режима Амура за всю историю наблюдений (126 лет) показал, что в последние десятилетия происходит рост амплитуды колебаний экстремальных уровней воды и возрастает количество крупных наводнений. Выявлено чередование периодов высокой и низкой водности через каждые 13–15 лет. Исторически самый низкий максимальный уровень воды в Амуре отмечен в период малой водности в 2008 г. (рис. 2а), самый значительный в период высокой водности — в 2013 г. (рис. 2б). Амплитуда составила 7,43 м,

в то время как раньше она никогда не превышала 4,03 м. В этот же период на Амуре впервые произошли подряд три катастрофических наводнения (2019, 2020, 2021 гг.). Они активизировали перераспределение стока воды между рукавами на разветвленных участках русла и интенсивный размыв берегов на значительных по протяженности участках реки. В русле реки образовались многочисленные осередки, косы и побочни. Интенсивная аккумуляция наносов была отмечена также в истоках второстепенных рукавов Амура.

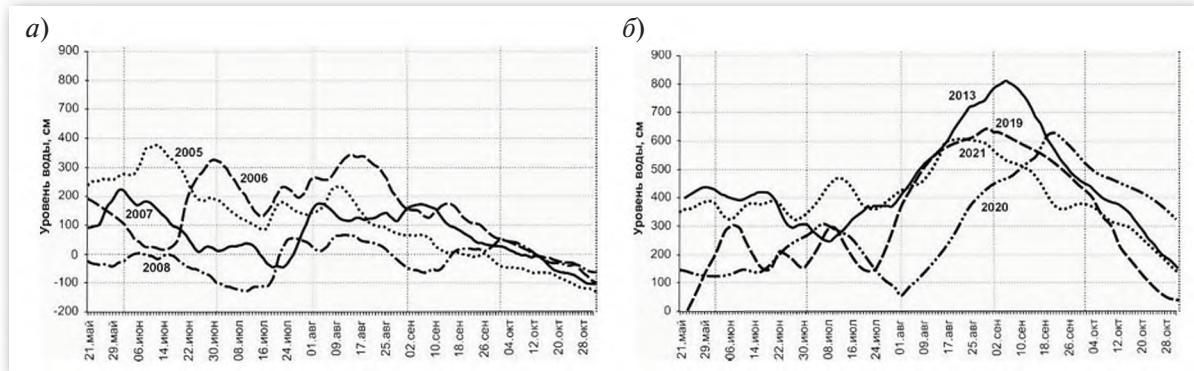


Рис. 2. Гидрографы паводков на реке Амур в различные периоды водности:
а — в период малой водности, б — в период высокой водности

Для последнего цикла водности установлено, что максимальная амплитуда колебаний экстремальных уровней воды обусловлена природными особенностями формирования стока в их бассейнах на фоне глобальных климатических изменений. В связи с этим имеется возможность долгосрочного прогноза катастрофических наводнений в бассейне Амура с большой заблаговременностью на основе оценки их связи с многолетними колебаниями стока. Это также имеет большое прикладное значение с точки зрения оценки активности русловых процессов.

Особое значение имеет оценка влияния изменений климата на динамику русловых процессов реки Амур. Перераспределение стока воды по рукавам в пределах русловых разветвлений и размыв берегов особенно интенсивно происходит во время больших наводнений, приуроченных к периодам высокой водности [8]. Наиболее значительные изменения выявлены на многорукавных участках реки. За один паводок скорость размыва берегов достигала местами 20 м при средних значениях 5–10 м в год. Катастрофическое наводнение 2013 г. спровоцировало многочисленные малые оползни в долине Амура. Подобные наводнения могут стать причиной более крупных оползневых явлений, особенно в узких долинах с крутыми склонами.

В результате анализа космических снимков и картографических материалов установлен эффект современной активизации русловых переформирований на многих участках русла реки Амур. Нежелательная направленность развития русловых процессов, прежде всего, перераспределение стока воды по рукавам особенно сильно проявляется в пределах пойменно-русловых разветвлений.

На фоне меняющихся климатических показателей и изменения водности химический состав воды и донных отложений реки Амур является функцией взаимодействия факторов природной среды и хозяйственной деятельности. Затопление обширных сельскохозяйственных земель, урбанизированных территорий и обводнение болот в большие паводки негативно влияют на загрязнение воды и донных отложений в русле реки, в которых отмечается концентрирование тяжелых металлов (Fe, Al, Mn, Cd, Co, Ni, Cr, Pb), особенно на участках ниже больших городов и впадения крупных притоков, дренирую-

ших территории с развитым сельскохозяйственным производством [9]. Многолетнее увеличение средней температуры воды за летний период будет способствовать повышению растворимости загрязняющих веществ и ухудшению качества водных ресурсов.

Таким образом, для крупных рек Дальнего Востока установлены ярко выраженная неравномерность многолетнего стока и чередование периодов повышенной и пониженной водности с периодичностью 12–15 лет. Наводнения в последний период высокой водности на Амуре были наиболее крупными и частыми за все время наблюдений. С ними связана высокая активность русловых деформаций на реках, особенно ярко выраженная на участках пойменно-русловых разветвлений. Неравномерность активности атмосферной циркуляции в северо-западной части Тихого океана и различия в ее продолжительности оказывает, вероятно, определяющее влияние на глобальное изменение климата в регионе и преобразование водного режима больших рек восточной части Азии, прежде всего, Амура, Хуанхэ и Янцзы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондур В. Г., Крапивин В. Ф., Савиных В. П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 629 с.
2. Данилов-Данильян В. И. Глобальные климатические изменения и водные проблемы России и мира // Век глобализации. 2020. № . 4. С. 65–78.
3. Wang X., Yang T., Wortmann M., Shi P., Hattermann F., Lobanova A., Aich V. Analysis of multi-dimensional hydrological alterations under climate change for four major river basins in different climate zones // Climatic Change. 2017. Vol 141. P. 483–498.
4. Зеленская Н. Н. Отклик целостной экосистемы на потепление климата // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 44–49.
5. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 124 с.
6. Махинов А. Н., Ким В. И., Матвеенко Д. В. Строение и многолетняя динамика ледяного покрова в нижнем течении реки Амур // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 117–126.
7. Махинов А. Н., Ким В. И. Влияние изменений климата на гидрологический режим реки Амур // Тихоокеанская география. 2020. № 1. С. 30–39.
8. Махинов А. Н., Лю Шугуан, Ким В. И., Махинова А. Ф. Особенности больших наводнений на реке Амур в период высокой водности 2009–2021 гг. // Тихоокеанская география. 2023. № 1. С. 66–74.
9. Махинов А. Н., Махинова А. Ф., Ким В. И. Динамика русловых процессов реки Амур и миграция тяжелых металлов в период наводнений // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 2. С. 58–63.

ПЛАНОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕАНДРИРУЮЩИХ РЕК КАК ОПАСНОЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ

В. И. Замышляев^{1,2}, канд. техн. наук

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.
Санкт-Петербургский филиал, Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУ Государственный гидрологический институт,
Санкт-Петербург, Россия

PLAN DEFORMATIONS OF MEANDERING RIVERS AS A HAZARDOUS HYDROLOGICAL PHENOMENON

V. I. Zamyshlyayev^{1,2}, PhD

¹ Shirshov Institute of Oceanology of RAS, St. Petersburg Branch,
St. Petersburg, Russia

²Federal State Budgetary Institution «State Hydrology Institute»,
St. Petersburg, Russia

В большинстве российских нормативных документов деформации, происходящие в руслах и поймах рек, не отнесены к опасным гидрологическим явлениям. А между тем, такие деформации — вертикальные и горизонтальные (плановые) — могут приводить к серьёзным, порой катастрофическим, разрушениям различных инфраструктурных и гражданских объектов, расположенных в руслах или на поймах рек: подмывам и разрушениям опор мостов, прорывам дамб обвалования, подмывам и обрушениям речных берегов с находящимися на них зданиями и сооружениями, что, несомненно, позволяет относить их к опасным гидрологическим явлениям. Наиболее выраженные и интенсивные плановые деформации наблюдаются у меандрирующих рек, когда берег такой реки может смещаться за год порой на несколько сотен метров, а при прорыве перешейка излучин основное русло вовсе меняет своё положение.

Deformations occurring in river channels and floodplains are not classified as hazardous hydrological phenomena in most Russian regulatory documents. Meanwhile, such deformations — vertical and horizontal (plan) — can lead to serious, sometimes catastrophic, destruction of various infrastructure and civil facilities located in river channels or floodplains: erosion and destruction of bridge supports, breakthroughs of levees, damage to underwater and above-water pipelines, erosion and collapse of river banks with buildings and structures located on them, which undoubtedly allows us to classify them as hazardous hydrological phenomena. The most pronounced and intense horizontal deformations are observed in meandering rivers, when the bank of such a river can shift sometimes several hundred meters per year, and when the meander cutoffs, the main channel changes its position totally.

В соответствии с классификацией природных опасностей, разработанной Госстандартом [1] и принятой в Росгидромете [2] и других ведомствах, опасное гидрологическое явление (ОГЯ) — это событие гидрологического происхождения или результат гидрологических процессов, возникающих под действием различных природных или гидродинамических факторов или их сочетаний, оказывающие поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую среду. В перечни ОГЯ, которые составлены в этих ведомствах, помимо таких явлений, как раннее ледообразование, заторы, зажоры, сели и проч., в основном входят либо опасное повышение уровня воды, с которым связываются наводнения, считающиеся наиболее опасными гидрологическими явлениями в нашей стране, или критическое понижение уровня воды (низкая межень), способное создать серьёзные проблемы для судоходства, энергетики и сельского хозяйства. В эти перечни, однако, не входят такие

события гидрологического происхождения как деформации речного русла, то есть по мнению составителей этих перечней русловые деформации не представляют существенную угрозу безопасности людей и не могут нанести значительного ущерба объектам экономики и населению. На самом деле легко привести многочисленные примеры того, к сколь серьёзным последствиям могут привести деформации русел и разрушение берегов, но прежде напомним, что такое русловой процесс, и какие научные дисциплины занимаются его изучением.

В соответствии с наиболее распространённым определением [3], русловым процессом называется изменения в морфологическом строении речного русла и речной поймы, постоянно происходящие под действием текущей воды. Научная дисциплина, занимающаяся изучением руслового процесса, называется Теорией руслового процесса, хотя можно встретить и другие названия: динамика русловых потоков, гидрология рек, речная гидравлика, русловедение и т. д. Проявлениями руслового процесса служат русловые деформации, т. е. происходящие под действием водного потока изменения русел рек, приводящие к повышению или понижению отметок дна, смещению форм русел или его частей, размывам и нарашиванию берегов. Русловые деформации подразделяют на горизонтальные (плановые), представляющие смещение русла в поперечном направлении вследствие размыва или намыва его берегов, и вертикальные (глубинные), представляющие изменения отметок дна русла в результате его размыва или отложения наносов. Вертикальные деформации русла могут достигать нескольких метров — иногда и больше — за относительно короткий промежуток времени, например, за время прохождения волны паводка, а плановые смещения русла могут составлять от десятков сантиметров до десятков метров в год. Наиболее интенсивные плановые деформации наблюдаются на меандрирующих реках, и при этом меандрирование является наиболее распространённым типом руслового процесса.

Русловые деформации могут приводить к серьёзным, порой катастрофическим, разрушениям различных инфраструктурных и гражданских объектов, расположенных в руслах или на поймах рек: подмывам и разрушениям опор мостов, прорывам дамб обвалования, повреждениям линий электропередач, подводных и надводных трубопроводов, водозаборов и водовыпусков, подмывам и обрушениям высоких речных берегов с находящимися на них зданиями и сооружениями и т. д. и т. п. Некоторые примеры подобных разрушений приведены на рис. 1. Разумеется, организации, ответственные за предотвращение катастрофических последствий ОГЯ, стремятся предотвратить их возникновение, для чего производятся инженерные мероприятия, обычно требующие значительных затрат.

Можно также назвать некоторые конкретные реки и места, где плановые деформации меандрирующих рек создают серьёзные проблемы на протяжении многих лет. Происходящие при меандрировании смещения береговой линии русла вынуждают переносить подальше от реки пляжи, парки, целые населённые пункты, автомобильные дороги, линии электропередач, аэропорты и другие инфраструктурные объекты. Из-за меандрирования во многих районах происходит поглощение рекой расположенных на пойме пастбищ, полей с сельхозкультурами, фруктовых садов. В некоторых случаях наоборот изменение положения русла приводит к «отползанию» реки от портовой инфраструктуры, угрожая экономике региона, как это происходит в расположеннном на реке Парана городе Росарيو — ключевом порту Аргентины. Иногда естественное меандрирование реки, которая служит границей между странами, приводит к продолжающимися десятилетиями межгосударственным территориальным спорам, как в случае с Мексикой и США, граница между которыми проходит по реке Рио-Гранде, и которая из-за смещения русла реки с 1850 г. сместились местами на 8 км.



Рис. 1. Примеры плановых русловых деформаций на меандрирующих реках — *а* и *б*; берегозащитные сооружения — *в* и *г*

Можно также привести оценки финансового ущерба, который могут приносить русловые деформации. В большинстве стран мира, включая Россию, источником наиболее опасных природных чрезвычайных ситуаций принято считать наводнения на реках, сопровождаемые каждый год человеческими жертвами и наносящие экономический ущерб, исчисляемый сотнями миллиардов долларов в год и чаще всего превосходящий ущерб от других источников чрезвычайных ситуаций. При этом происходящие в реках и на поймах русловые деформации часто оказываются недооценёнными, хотя каждый год они также наносят огромный экономический ущерб. Исследования, проведенные в 2022 г. Британской геологической службой и Комитетом по изменению климата Великобритании [4], показали, что последствия от явлений и процессов, связанных с речной эрозией, наносят ущерб экономике этой страны в размере ~336 млн в год. Кроме того, эти процессы являются значительным источником загрязнения воды, на устранение которого уходит ~238 млн в год. Речная эрозия также увеличивает расходы на очистку воды и обслуживание дренажных сетей на ~132 млн в год и является причиной 25 процентов выплат по страховым случаям. Таким образом, подобные явления и процессы могут приводить к негативным социальным и экономическим последствиям, требующим огромных средств на их устранение. При этом в отличие от опасностей, связанных с паводковыми водами, которые со временем отступают, изменения, возникающие в результате речной эрозии, могут быть постоянными. Это делает размыв реки чрезвычайно разрушительным, особенно когда он затрагивает такие прилегающие к рекам объекты, как жилые дома, исторические места, сельскохозяйственные угодья, мосты, защитные сооружения от наводнений, опорам электропередач и т. д. В настоящее время риск размыва рек для железнодорожных мостов Великобритании, по оценкам, приводит к потере 8,2 млн пассажирских поездок в год, а ежегодные экономические затраты составляют до ~60 млн. Подобные события служат ярким и все более частым напоминанием о разрушительных последствиях размыва рек, показывающим необходимость дальнейшего изучения эрозионных процессов речного русла. Например, в Законе правительства

Великобритании об охране окружающей среды (2021 г.) поставлена задача снизить воздействие физических изменений на водную среду, и в период с 2009 по 2015 гг. на достижение этой цели было потрачено ~68 млн. В результате способность прогнозировать вероятные места возникновения размывов в речной сети Великобритании становится все более важной особенно в свете возможных негативных сценариев изменения климата.

Всё вышеизложенное показывает, что русловые деформации должны рассматриваться как опасные гидрологические явления, и в ряде стран мира это обстоятельство находит понимание и отражение в правительственные программах. Понятно, что в нашей стране, территории которой многократно превышает территорию Великобритании, и в которой рек гораздо больше, причём в основном эти реки значительно крупнее рек Великобритании, задача изучения русловых деформаций не менее актуальна. Понимание указанной проблемы постепенно приходит и к нашим органам, занимающимися в стране регулированием в этой сфере. Во вступившем в силу в 2024 г. межгосударственном стандарте «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники природных чрезвычайных ситуаций. Поражающие факторы. Номенклатура параметров поражающих воздействий» (ГОСТ 22.0.06–2023) [5] в число опасных гидрологических явлений и процессов включены «Переработка берегов — Линейное отступание берегов на защищаемой территории» и «Речная эрозия — Размыв и смыв грунтов водными потоками на защищаемой территории». Стандарт разработан МЧС России и должен применяться организациями, учреждениями, предприятиями, коллективами, участвующими в обеспечении безопасности в природных ЧС. Надо полагать, что аналогичные ведомственные документы, например, действующий документ Росгидромета по гидропрогнозам РД 52.04.563–2013 со временем будут приведены в соответствие с указанным ГОСТом.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 22.1.08-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных гидрологических явлений и процессов. Общие требования (утв. Постановлением Госстандарта РФ от 24.05.1999.178).
2. РД 52.04.563-2002. Инструкция. Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения. СПб: Гидрометеоиздат, 2002.
3. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сниченко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 272 с.
4. <https://www.bgs.ac.uk/news/river-erosion-the-forgotten-hazard-of-flooding/> (Электронный ресурс).
5. ГОСТ 22.0.06-2023. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники природных чрезвычайных ситуаций. Поражающие факторы. М.: РИС, 2023.

МЕТОДИКА ДВУМЕРНОГО АНАЛИЗА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ

Е. В. Гайдукова¹, канд. техн. наук, К. Э. Лобанов¹

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия

METHODOLOGY OF TWO-DIMENSIONAL ANALYSIS OF HYDROLOGICAL RISKS

E. V. Gaidukova¹, Ph.D., K. E. Lobanov¹

¹Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

Рассматривается алгоритм построения двумерной поверхности обеспеченности по рядам наблюдения за гидрометеорологическими характеристиками на речном водосборе. Получено, что предлагаемая методика дает наглядные результаты оценки возможных гидрологических рисков. Полученные выводы могут быть применены при планировании и строительстве гидротехнических сооружений различных классов капитальности.

An algorithm for constructing a two-dimensional surface of security based on observation series of hydrometeorological characteristics in a river catchment area is considered. It is found that the proposed method yields visual results of assessing possible hydrological risks. The findings can be applied in planning and constructing hydraulic structures of various capital classes.

На величину речного стока в различных физико-географических зонах в разной степени могут влиять такие факторы, как испарение и увлажненность водосбора, которые, наряду со стоком, входят в расходную часть уравнения водного баланса. Возникает необходимость учета совместно со стоком второй наиболее важной составляющей при статистическом описании формирования речного стока. Существуют алгоритмы построения двумерных поверхностей плотности вероятности: графический способ, гра-фоаналитический метод и аналитический метод [1, 2]. Все эти подходы учитывают вторую фазовую переменную при описании речного стока — испарение. Главным недостатком перечисленных подходов и последующего получения условных кривых обеспеченности является сложность интерпретации результатов в рамках нормативной инженерной гидрологии.

В инженерной гидрологии применяются безусловные значения обеспеченных (вероятностных) характеристик, но данный подход не позволяет учитывать наиболее значимые условия, при которых происходит формирование той и иной характеристики. Имеется в виду фактор, который оказывает наибольшее влияние на рассматриваемую величину. Например, в засушливых районах совместно с расходами воды в замыкающих створах речных водосборов необходимо учитывать испарение, а на увлажненных водосборах — изменение влажности почвогрунтов. Перечисленные выше подходы построения двумерных поверхностей плотности вероятности не являются простыми для использования в инженерных изысканиях. Именно поэтому необходимо перевести вероятностные поверхности в поверхности обеспеченности, по которым можно оценить риски максимальных значений расходов воды, но с учетом, например, возможного испарения. Примеры сравнения условных и безусловных кривых обеспеченности приведены в работе [1].

Целью данного исследования является разработка методики построения и анализа двумерной поверхности обеспеченности для оценки гидрологических рисков и проверка работоспособности этой методики на примере рек с различными характеристиками водосбора.

Для апробации разрабатываемого подхода было выбрано 15 речных водосборов, площадь которых соответствует диапазону от 1000 до 50000 км². Водосборы находятся и в северных, и в южных районах Европейской части России. Ряды наблюдений за стоком на выбранных водосборах имеют достаточную продолжительность для надежной статистической оценки. Совместный период наблюдений за гидрологическими и метеорологическими характеристиками (упругостью водяного пара и температурой воздуха, необходимыми для расчета значений испарения по номограмме Константина) — с 1951 по 1988 гг.

Для построения двумерной плотности вероятности использовался графо-аналитический метод, который запрограммирован в среде *MatLab*, и результаты показаны на рис. 1. Теоретическая поверхность плотности вероятности «разрезается» по норме испарения, тем самым получается проекция на ось стока h — условная плотность вероятности [2]. Данный метод представляет условные кривые обеспеченности для конкретных значений испарения.

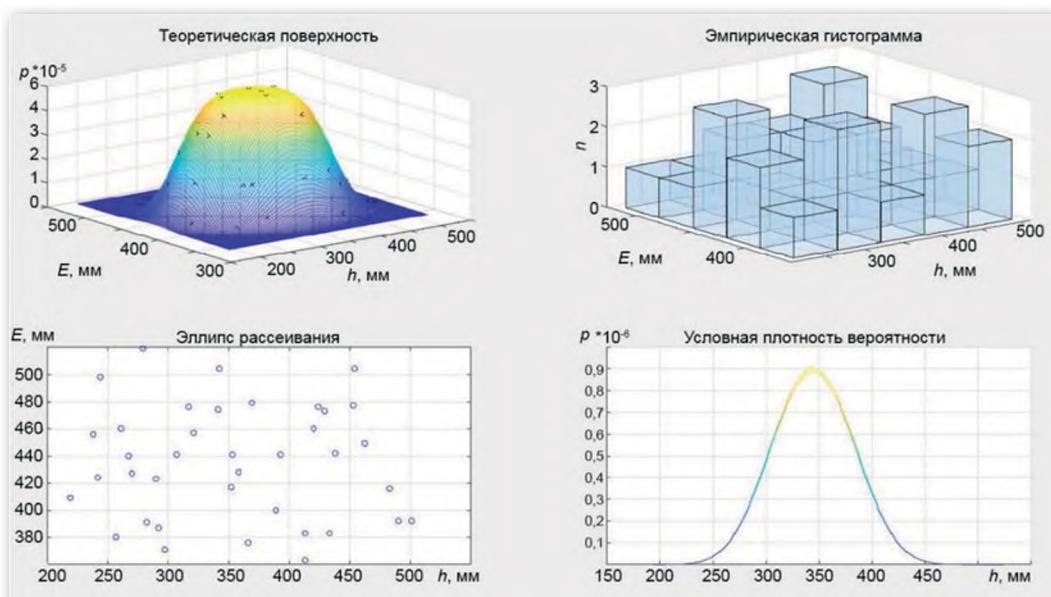


Рис. 1. Графический результат графоаналитического метода:
теоретическая поверхность плотности вероятности, эмпирическая гистограмма,
эллипс рассеивания, условная кривая вероятности
(при условии, что величина испарения равна среднемноголетнему значению)

Созданный алгоритм методики построения поверхности обеспеченности был запрограммирован в среде *MatLab*. Программа начинается с проверки длины ряда переменных стока Q и испарения E , это важно для корректного статистического анализа, так как ряды должны иметь одинаковую длину.

Далее программа вычисляет основные статистические показатели: коэффициент корреляции между стоком и испарением; автокорреляцию по каждому из рядов; средние значения, минимальные и максимальные значения; стандартное отклонение; коэффициенты вариации; коэффициенты асимметрии; относительные погрешности стандартных отклонений; погрешности коэффициентов вариации; погрешности коэффициентов асимметрии.

На основе рассчитанных параметров строится модель двумерного распределения — двумерная плотность вероятности, которая моделируется как многомерное распределение с учетом корреляционной связи между переменными. Для этого создаются сетки

значений Q и E с шагами, определяемыми диапазонами данных и выбранной точностью. Затем вычисляется плотность вероятности для каждой точки сетки с использованием формулы двумерного распределения.

Для более детального анализа и выполнения главной цели работы программы выполняет итерации по различным значениям испарения. Для каждого значения строится условная плотность вероятности, из них извлекаются кумулятивные суммы вероятностей, которые позволяют определить вероятность попадания наблюдений в определенные диапазоны при заданном значении испарения. Эти данные сохраняются в массивы для последующего построения поверхности обеспеченности.

Результатом работы программы является искомый график — двумерная поверхность обеспеченности, которая является набором пересчитанных условных плотностей вероятности. Ось обеспеченностей сделана логарифмической.

Апробация подхода показала следующее. Теоретические поверхности водосборов, расположенных в схожих природных условиях, подобны, например, для рек Паша, Луга, Сороть. При сравнении же водосборов рек, находящихся на большом удалении друг от друга, становится заметно различие в получаемых графиках.

На рис. 2 a видно, что для р. Луга максимальные и минимальные значения, соответствующие при этом 0,1 и 99,9% обеспеченности соответственно, достигаются при значении испарения равному 476 мм. Также можно отметить, что кривая обеспеченностей, соответствующая минимальному значению испарения в ряду (413 мм), имеет большую вариативность по стоку, в сравнении с кривой, соответствующей максимальному значению испарения (570 мм). На рис. 2 b можно наблюдать, как двумерная поверхность до обеспеченности, примерно равной 50%, является выпуклой, а после поверхность становится вогнутой. Данная закономерность наблюдается на всех двумерных поверхностях рассматриваемых водосборов и согласуется с классическим одномерным видом кривой обеспеченности.

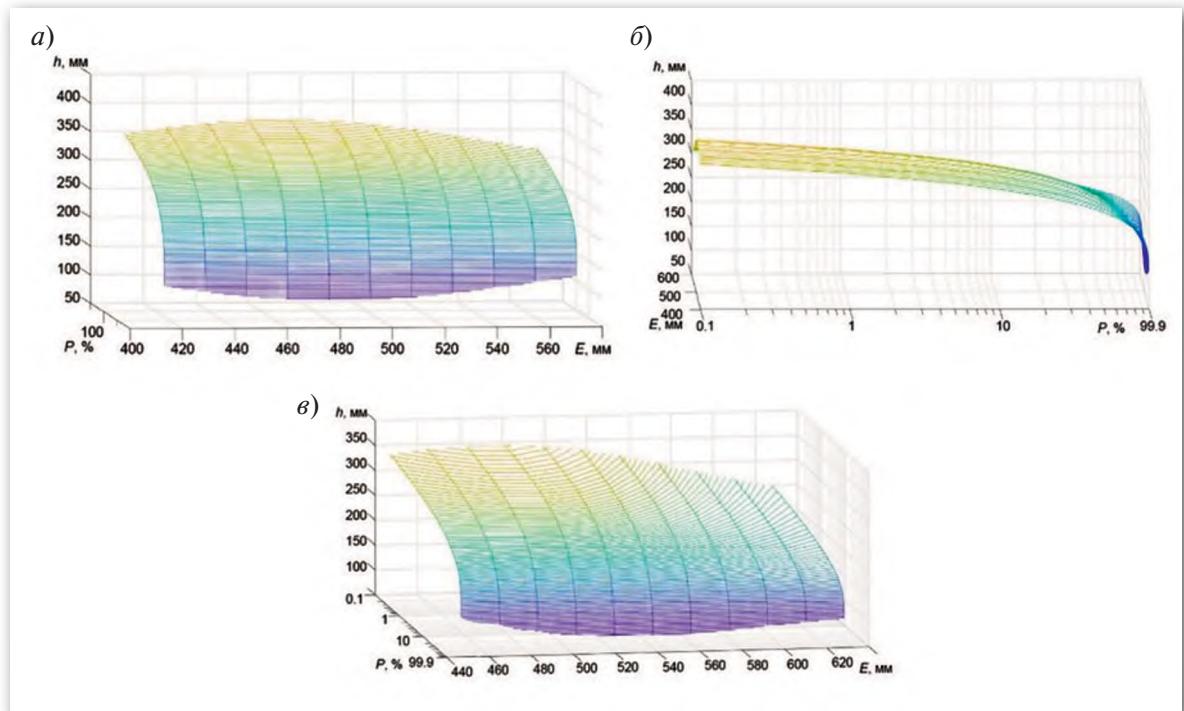


Рис. 2. Двумерные поверхности обеспеченности:
р. Луга — г. Кингисепп (а, б); р. Великая — д. Гуйтово (в)

На рис. 2в видно, что для р. Великая максимальные и минимальные значения, соответствующие при этом 0,1 и 99,9% обеспеченности соответственно, достигаются при значении испарения немного меньшем, чем среднемноголетнее значение (514 мм).

Разработанная методика обладает рядом преимуществ перед традиционным подходом (одномерными кривыми обеспеченности): увеличение глубины анализа учетом второго ключевого параметра (испарения); повышение точности оценки риска благодаря комплексной картине взаимодействия стока и климатических факторов; упрощение практической реализации за счет автоматизированного инструмента, интегрированного в среду программирования *MatLab*.

Работа направлена на разработку и апробацию метода получения поверхности обеспеченности гидрометеорологических характеристик. Апробация разрабатываемого подхода произведена на гидрометеорологических данных водосборов, отличающихся условиями формирования стока. Показано, что предлагаемая методика дает наглядные результаты оценки возможных гидрологических рисков. Работа является актуальной, поскольку полученные выводы могут быть применены при планировании и строительстве гидротехнических сооружений различных классов капитальности.

Следует отметить некоторые перспективные направления в развитии данного исследования, которые связаны с учетом не только испарения, но и других гидрометеорологических характеристик конкретных речных водосборов в зависимости от условий формирования речного стока (например, учет увлажненности для водосборов, находящихся в зоне избыточного и достаточного увлажнения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайдукова Е. В., Шаночкин С. В., Москалюк М. А. Учет испарения при математическом моделировании речного стока // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 52. С. 79–87.
2. Гайдукова Е. В., Кулешова М. А. Методика определения условных обеспеченных значений расходов воды // Тр. конф. 2023. С. 256–263.

РАЗДЕЛ 4

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЛИТОСФЕРЕ

К ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА ТИПИЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВЫХ АНОМАЛИЙ, КАТАЛОГ ЈМА, ЯПОНИЯ

*M. V. Родкин^{1,2}, д-р. физ.-мат. наук,
E. V. Липеровская², канд. физ.-мат. наук*

¹ИТПЗ РАН, Москва, Россия, ²ИФЗ РАН, Москва, Россия

ON EARTHQUAKE PROGNOSIS WITH THE COMPLEX OF TYPICAL PRECURSORY ANOMALIES, JMA CATALOGUE, JAPAN

*M. V. Rodkin^{1,2}, Dr. Sc.,
E. V. Liperovskaya², Ph.D.*

¹IEPT RAS, Moscow, Russia ²IPF RAS, Moscow, Russia,

Принято полагать, что прогноз землетрясений возможен, но получению эффективного прогноза мешает сильная фоновая изменчивость сейсмического режима и неясность характера предвестников. Результаты построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) позволяют существенно уточнить характер предвестников. В результате анализа ООСЗ был получен набор детально описанных типовых (осредненных) предвестниковых аномалий, и было показано, что доля ретроспективно «спрогнозированных» событий растет с числом событий, зарегистрированных в форшоковой области данного целевого землетрясения. В работе представлены результаты анализа выделения осредненных ООСЗ аномалий в форшоковых областях 1000 сильнейших землетрясений по каталогу JMA, Япония. Сравниваются распределения параметров истинных и ложных тревог.

It is generally accepted that earthquake forecasting is possible, but the strong background variability of the seismic regime and the unclear nature of the precursors make it difficult to obtain an effective forecast. The results of constructing and analyzing the generalized vicinity of a large earthquake (GVLE) allow us to significantly refine the nature of the precursors. The analysis of the GVLE resulted in a set of detailed descriptions of typical (averaged) precursor anomalies, and it was shown that the proportion of retrospectively “predicted” events increases with the number of events recorded in the foreshock region of the target earthquake. The paper presents the results of the analysis of the selection of averaged GVLE anomalies in the foreshock areas of individual large earthquakes according to the JMA catalog, Japan. The distributions of the parameters of true and false alarms are compared.

Известно довольно много подходов к прогнозу землетрясений [1–4 и многие другие]. Последовавшие проверки в режиме реального времени показали, что лучшие прогнозы обеспечивают результат много лучше случайного угадывания, т. е. прогноз

принципиально возможен. Однако качество прогноза не удовлетворяет практическим требованиям. Велико число как ложных тревог, так и пропусков цели.

Основными препятствиями на пути получения эффективного прогноза полагаются сильная фоновая изменчивость сейсмического режима, отсутствие достаточно развитой физической модели сейсмического процесса и недостаток фактических данных. Построение и анализ обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) позволяет существенно продвинуться в этих вопросах [5]. Поясним этот метод. Методом ООСЗ суммируются окрестности большого числа (обычно сотни, до 1000) сильнейших по магнитуде событий из данного каталога (могут отбираться события данного типа, например, неглубокие). Каждое такое сильное событие (в соответствие с принятой в сейсмологии терминологией) является главным событием для своей окрестности. Размер окрестности примем зависящим от магнитуды данного главного события (обычно рассматривается область радиусом в 3–4 размера очага этого сильного события и в заданных ограничениях по глубине). В сформированную таким образом обобщенную окрестность попадает большое число слабых землетрясений, каждое из которых характеризуется различием по времени от момента соответствующего главного события (Δt) и нормированным расстоянием от данного главного события (могут рассматриваться параметры гипоцентра главного события или его координаты по решению сейсмического момента). Ввиду большого числа используемых при построении ООСЗ сильных событий (сотни, до 1000) и, соответственно, огромного числа попадающих в обобщенную окрестность слабых событий, метод ООСЗ позволяет элиминировать сильные (обычно доминирующие) флукутации сейсмического режима, а также надежно и детально выявлять систематическую компоненту сейсмического режима — искомую прогнозную аномалию.

Методом ООСЗ был надежно выявлен и детально описан набор типовых (средних) прогнозных аномалий. В зависимости от используемого каталога, число ООСЗ аномалий меняется от 2–3 до 6–8. Для типового каталога, когда землетрясение характеризуется временем, положением гипоцентра и одной магнитудой, могут наблюдаться аномалии форшокового роста (степенного каскада) числа слабых событий, изменений средней глубины и магнитуды (роста величин b -value).

На рис. 1 в качестве примера представлена динамика форшокового процесса в ООСЗ, $M_b > 5$, GCMT каталог, полученная сложением потоков для 1000 сильнейших землетрясений в зависимости от расстояния, нормированного на размер очага [6]. Видно, что характерное время развития ООСЗ аномалий от фона до главного события составляет ~ 100 дней. При построении ООСЗ аномалий были рассмотрены форшоки на расстояниях до трех размеров очага от эпицентров главных землетрясений, где размер очага $Rs = \exp(0,5M - 1,9)$ [1].

В работах [6, 7], было показано, что средняя интенсивность потока числа форшоков n нарастает в ООСЗ к моменту обобщенного сильного землетрясения (ОСЗ) по степенному закону (рис. 1а) согласно

$$\lg(n) = a + b \lg(\Delta t), \quad (1)$$

где Δt — время от момента ОСЗ.

Амплитуды A аномалий величин изменений среднего значения магнитуд $M \geq M_c$ и средней глубины форшоков нарастают по мере приближения к моменту обобщенного главного события (рис. 1б) согласно

$$A = a + b \lg(\Delta t). \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) $\{a, b\}$ — подлежащие определению коэффициенты. Характерное время развития всех ООСЗ аномалий, когда значения интенсивности потока числа

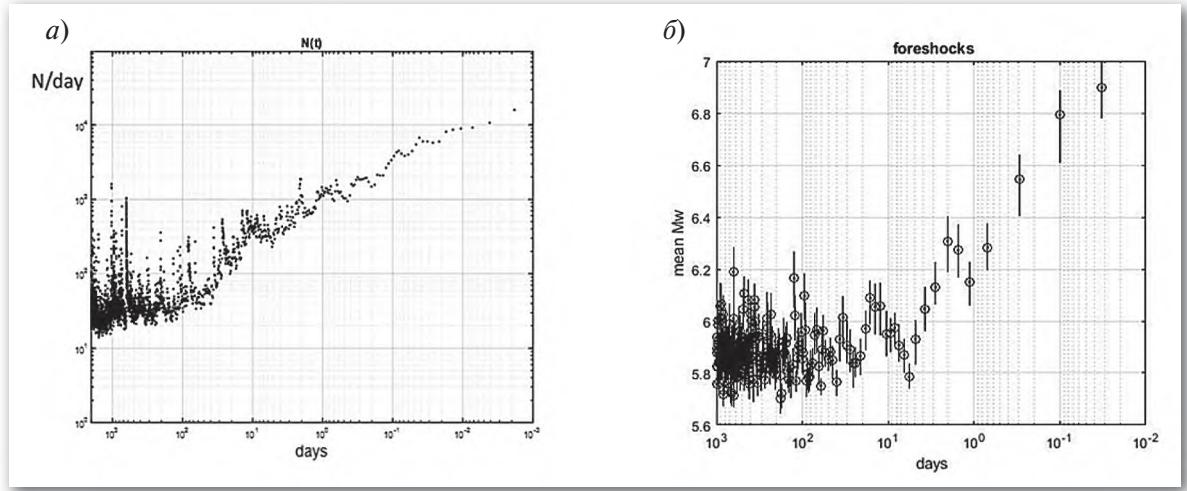


Рис. 1. Динамика форшокового (а) процесса в ООСЗ:

а — для потока событий; б — для средней магнитуды. Средние значения рассчитаны для последовательных по времени 50 событий с шагом 25 событий

форшоков, магнитуд и средней глубины форшоков становятся близки к фоновым, составляет порядка 100 дней. Форшоковые области принимаются круговыми с радиусом обычно 3 или 4 размера очага R данного сильного землетрясения. Для афтершоков картина почти зеркальная (на динамике афтершокового каскада мы здесь не останавливаемся).

Типовой характер (1) и (2) прогнозных ООСЗ аномалий исходно был получен по данным мировых каталогов землетрясений. Но они недостаточно подробны для получения прогноза отдельных сильных событий. В работе [7] для проверки возможности получения эффективного прогноза использовались данные регионального каталога Камчатки и Северных Курильских островов. Ниже будем проверять возможность получения эффективного прогноза по данным каталога JMA Японии.

Будем искать типовые ООСЗ аномалии в форшоковых областях 1000 сильнейших землетрясений JMA каталога, которые будем далее называть целевыми событиями. Учитывая среднюю длительность типовых ООСЗ аномалий в 100 дней, будем рассматривать совокупности слабых $M1,5+$ землетрясений в интервалах времени 5, 10, 50, 100 и 200 дней до соответствующего целевого события на расстояниях $R < 4R_s$, от данного целевого события. Таким образом, для каждого рассматриваемого сильного землетрясения и для каждого вида аномалии можно получить пять наборов коэффициентов a и b . Типичен случай, когда прогнозная аномалия регистрируется для нескольких интервалов времени, но во всех интервалах времени (5, 10, 50, 100 и 200 дней) она наблюдается крайне редко. Будем считать прогнозную аномалию наблюденной, если случайная реализации получившейся связи типа (1) или (2) для реально наблюденного потока событий имеет вероятность менее 0,05.

Для проверки прогнозного алгоритма важно не только то, как часто прогнозная аномалия идентифицируется перед целевыми событиями, но и то, как часто прогнозные аномалии типа (1) и (2) с ожидаемыми значениями коэффициентов $\{a, b\}$ возникают вне связи с сильными землетрясениями.

На рис. 2 представлены наборы полученных таким образом значимых коэффициентов регрессии для потока событий: красные точки — значения для форшоковых областей реальных землетрясений, иные — для «случайных землетрясений», у которых координаты и магнитуда совпадают с реальными, а момент землетрясения выбран случайно.

На панели (а) представлены значения для первых 500 сильнейших по магнитуде событий каталога, (б) — для следующих 500 сильнейших.

На рис. 3 аналогично представлены данные по статистически значимым коэффициентам регрессии для роста средней магнитуды событий (эквивалентно уменьшению b -value) для форшоковых каскадов реальных и «случайных» событий для совокупности 500–1000 сильнейших событий. В этом случае также характерно развитие нескольких прогнозных аномалий для одного события.

Область типичных значений коэффициентов $\{a, b\}$ на рисунках выделена зеленым прямоугольником. Типична ситуация, когда статистически значимая типовая аномалия для одного целевого события наблюдается несколько раз — для разных интервалов времени до целевого события и для разного типа аномалий. Поэтому число прогнозных аномалий часто превышает число целевых событий.

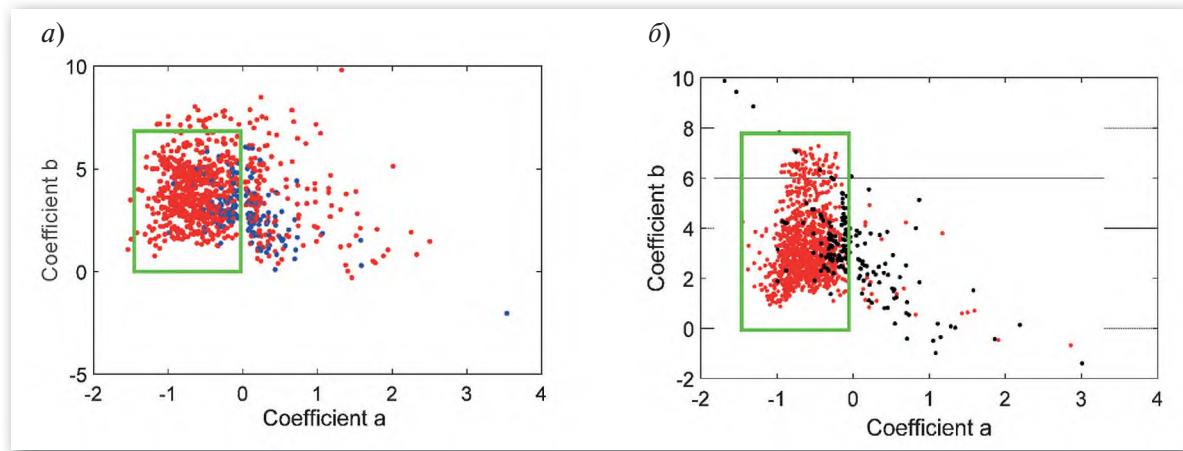


Рис. 2. Коэффициенты a и b из соотношения (1):

Левая панель (а) для 1–500, правая (б) для 501–1000 сильнейших событий, JMA, Япония.

Красные точки — коэффициенты для реальных землетрясений, синие и черные — для «случайных» событий; зеленым выделена область типичных прогнозных значений коэффициентов

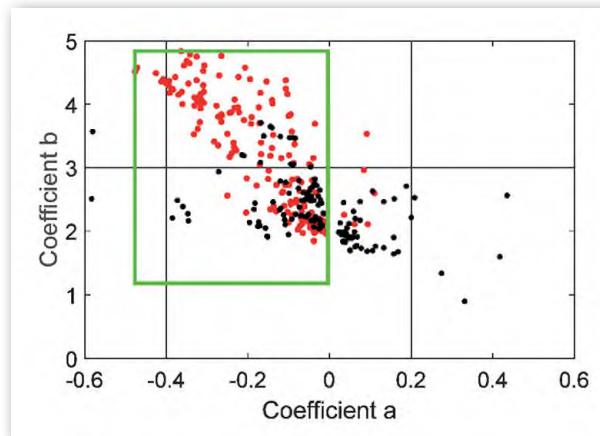


Рис. 3. Коэффициенты a и b из соотношения (2) для 1–500 сильнейших событий, JMA, Япония. Аномалия роста средней магнитуды событий.

Красные точки — коэффициенты для реальных землетрясений, черные — для «случайных» событий; зеленым выделена область типичных значений коэффициентов

Наблюдалась сильная тенденция роста доли «ретроспективно спрогнозированных» событий с магнитудой события и с числом событий, зарегистрированных в области подготовки данного сильного землетрясения. В случае достаточного объема данных, когда магнитуда целевых событий больше минимальной регистрируемой магнитуды на пять единиц, вероятность наблюдения, но крайней мере одного из ООСЗ признаков, приближается к 100%. Доля целевых событий, в форшоковых областях которых выявляются прогнозные аномалии, может полагаться удовлетворительной, но число ложных тревог представляется довольно большим. В дальнейшем, в целях получения практически полезного прогноза, будет решаться вопрос минимизации числа ложных тревог, при сохранении удовлетворительно малой доли пропусков цели.

Результаты построения и анализа ООСЗ позволяют существенно уточнить характер предвестников. В результате анализа ООСЗ получается набор детально описанных осредненных предвестниковых аномалий.

При использовании для оценки эффективности такого метода прогноза каталога JMA для региона Японии наблюдалась сильная тенденция роста доли «ретроспективно спрогнозированных» событий с магнитудой события и с числом событий, зарегистрированных в области подготовки данного сильного землетрясения. В случае достаточно-го объема данных, когда магнитуда целевых событий больше минимальной регистрируемой магнитуды на 4–5 единиц, вероятность наблюдения по крайней мере одного из ООСЗ прогнозных признаков приближается к 100%. Подобные результаты были получены ранее и по данным каталога Камчатки и Северных Курильских островов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
2. Kagan Y. Y., Jackson D. D. Probabilistic forecasting of earthquakes // Geophys. J. Int. 2000. № 143. P. 438–453.
3. Jordan T. H., Chen Y.-T., Gasparini P., Madariaga R., Main I., Marzocchi W., Papadopoulos G., Sobolev G., Yamaoka K., Zschau J. Operational earthquake forecasting — state of knowledge and guidelines for utilization // Annals Geophysics. 2011. V. 54 (4) P. 315–391.
4. Кособоков В. Г., Соловьев А. А. Об оценке результатов тестирования алгоритмов прогноза землетрясений // Доклады РАН. 2015. Т. 460. № 6. С. 710–712.
5. Rodkin M. V., Tikhonov I. N. The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake // Physics and Chemistry of the Earth. 2016. V. 95. P. 73–84.
6. Родкин М. В. Типовая фор- и афтершоковая аномалия — эмпирика, интерпретация // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 64–76.
7. Родкин М. В., Андреева М. Ю. О проявленности типовых предвестниковых аномалий в форшоковых областях сильных землетрясений, Курило-Камчатский регион // Вулканология и сейсмология. 2025. № 2. С. 62–72.

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РЕГИОНЕ ЭГЕЙСКОГО МОРЯ В СВЯЗИ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ И ВУЛКАНИЗМОМ

П. А. Докукин¹, канд. техн. наук, Э. Гёк², PhD,
В. И. Кафтан³, д-р техн. наук, И. Кафтан², PhD,
Р. В. Шевчук³, канд. техн. наук

¹Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

²Университет Девятого сентября, Измир, Турция

³Геофизический центр РАН, Москва, Россия

RECENT CRUSTAL MOVEMENTS AND DEFORMATIONS IN THE AEGEAN SEA REGION IN CONNECTION WITH SEISMICITY AND VOLCANISM

P. A. Dokukin¹, Ph.D., E. Gök², Ph.D.,
V. I. Kaftan³, Dr. Sc., I. Kaftan², PhD.,
R. V. Shevchuk³, Ph.D.

¹People Friendship University, Moscow, Russia

²Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey

³Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Рассматриваются результаты экспериментального исследования эволюции движений и деформаций земной коры региона Эгейского моря по данным ГНСС на интервале 12 лет (с 2011.8 по 2023.5 гг.) и региональной сейсмичности на интервале 19 лет (с 2005.0 по 2024.2 гг.). Визуализация исследуемых процессов позволила обнаружить источник распространения аномальных движений и деформаций в районе происхождения сейсмического роя в области Санторин-Аморгос за 12 лет до события. Движения и деформации протекали закономерно, согласованно с ходом сейсмичности и характером тектоники региона. Выявлена уникальная двухлетняя региональная сейсмическая пауза перед сильнейшим землетрясением Самос (2020 г., M7). Сделано предположение о первичности сдвиговых деформаций на локальных разломах, спровоцировавших внедрение локальной интрузии за 12 лет до образования очага растяжения и сейсмического роя Санторин-Аморгос.

The article presents the results of an experimental study of the evolution of crustal movements and deformations in the Aegean Sea region based on GNSS data over a 12-year interval (from 2011.8 to 2023.5) and regional seismicity over a 19-year interval (from 2005.0 to 2024.2). Visualization of the processes under study made it possible to detect the source of propagation of anomalous movements and deformations in the area of origin of the seismic swarm in the Santorini-Amorgos region 12 years before the event. The movements and deformations proceeded in a regular manner, consistent with the course of seismicity and the nature of the tectonics of the region. A unique two-year regional seismic pause was revealed before the strongest Samos earthquake (2020, M7). An assumption was made about the primacy of shear deformations on local faults, which provoked the introduction of a local intrusion 12 years before the formation of the source extension and seismic swarm of Santorini-Amorgos.

Причиной внимания к региону Эгейского моря послужило сильное землетрясение Самос 30 октября 2020 г. с M=7. Наибольшее число разрушений и человеческих жертв землетрясение вызвало в г. Измир (Турция). На островах и побережье Эгейского моря функционирует сеть непрерывных станций ГНСС разных государств и ведомств. На многих станциях сети до момента землетрясения накоплено порядка 12 лет наблюдений. Геодезическая лаборатория Невады (США) осуществляет обработку

измерительных данных ГНСС на станциях мира и представляет исследователям временные ряды координат в открытом доступе [1]. Эти данные с суточным временным разрешением были использованы для исследования эволюции современных движений и деформаций земной коры. Для изучения сейсмической активности региона нами была использована база данных EMSC (2009–2024). Цифровые данные о положении тектонических разломов были заимствованы из базы данных проекта (Глобальные активные разломы, GEM Hazard Team, США) <https://blogs.openquake.org/hazard/global-active-fault-viewer/>.

В результате комплексных исследований сейсмо-тектонических и сейсмо-деформационных процессов получены интересные закономерности.

Статистический анализ региональной сейсмичности на 19-летнем интервале позволил обнаружить редкое событие — двухлетнее сейсмическое затишье перед сильнейшим землетрясением Самос (рис. 1). Не исключена возможность проявления подобного предвестника перед другими сильными землетрясениями.

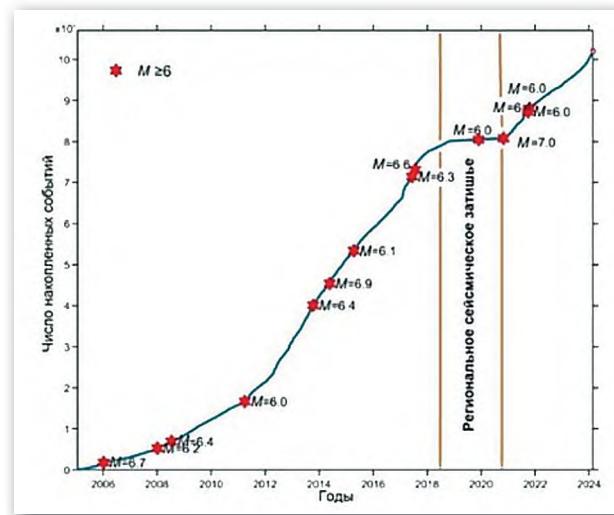


Рис. 1. Рост числа землетрясений $2 \leq M < 6$ за период исследований. Двухлетнее затишье ограничено оранжевыми линиями

Для изучения пространственно-временной эволюции движений и деформаций земной коры создавались синоптические анимации [2–5], позволившие наблюдать поведение геодинамических характеристик в связи с ходом сейсмичности региона.

Поведение векторов горизонтальных (быстрый рост) и изолиний вертикальных (умеренные поднятия) движений продемонстрировало начало их зарождения и накопления к северо-востоку от о-ва Санторин [5]. Примечательно, что именно здесь в феврале 2025 г. произошел беспрецедентный рой слабых и умеренных землетрясений, вызвавший панику среди

местного населения и туристов. Аномальные движения земной коры развивались вплоть до момента землетрясения Самос, распространяясь на внутреннюю акваторию Эгейского моря, достигая максимума в его эпицентре. В прежних исследованиях, в частности в [6], нами показано, что в областях подготовки сильных сейсмических событий, в разных регионах мира, формируется дефицит (недостаточность) внутренних движений земной коры. Такие области сформировались и в регионе Эгейского моря перед сильнейшими землетрясениями. Землетрясения происходят как в зоне экстремума дефицита, так и на окраине этой области [2]. На рис. 2 представлена карта дефицита движений перед землетрясением Самос 2020 г. и его последующее исчезновение за счет разрушения очаговой зоны.

Заметим, что область дефицита накопленных смещений (критических напряжений) уже начала разрушаться перед событием за счет слабых землетрясений (рис. 2а).

Векторы накопленных горизонтальных смещений (сиреневые стрелки на рис. 2) до и особенно после землетрясения продемонстрировали противонаправленное движение береговой территории Турции (сев.-сев.-восток) и срединной части акватории Эгейского моря (юго-юго-запад). Этот эффект нами интерпретируется как взаимное левостороннее перемещение Эгейской и Анатолийской микроплит. Скорость этого перемещения получена равной 15 мм в год.

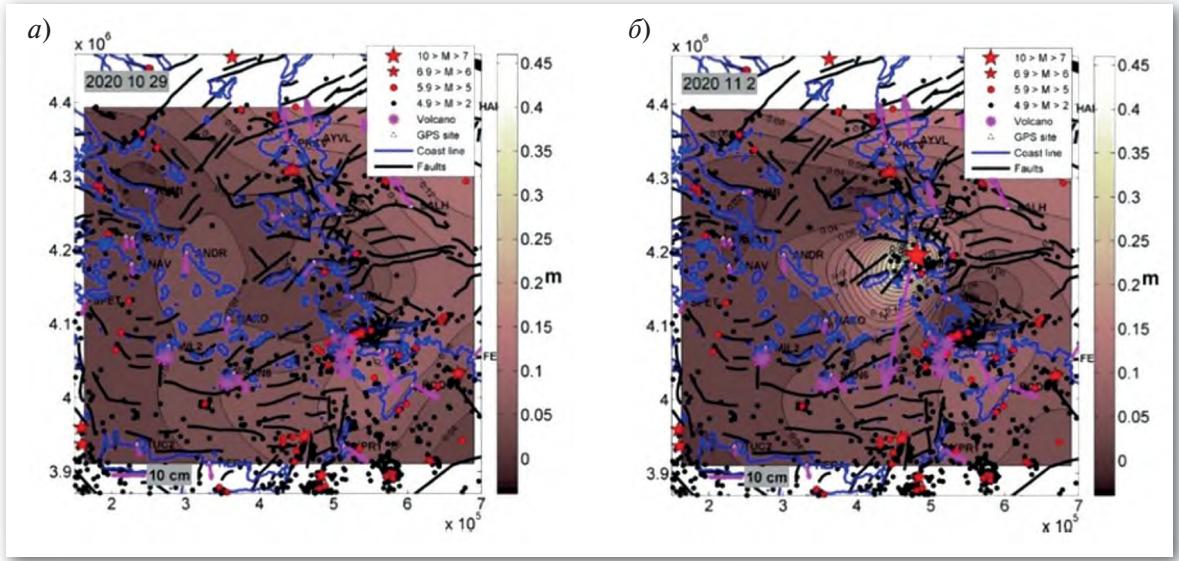


Рис. 2. Дефицит накопленных горизонтальных смещений станций ГНСС перед землетрясением Самос:

а — тёмно-коричневая зона дефицита. б — область разрушения дефицита

Важной характеристикой в аспекте исследования механизма подготовки коровых землетрясений является деформация полного сдвига [3]. Она отражает процессы сдвиговой кинематики тектонических разломов и окружающих территорий. Исследования эволюции деформации полного сдвига позволили обнаружить медленные деформационные волны, играющие важную роль при подготовке и разрядке сильных землетрясений [7]. Горизонтальная деформация дилатации, регистрируемая по данным ГНСС-наблюдений, отражает характер косейсмических деформаций в эпицентralьных зонах сильных землетрясений, а также глубинные процессы влияния подкоровых вязких течений на верхние слои земной коры. Карты пространственного распределения полного сдвига и дилатации представлены на рис. 3.

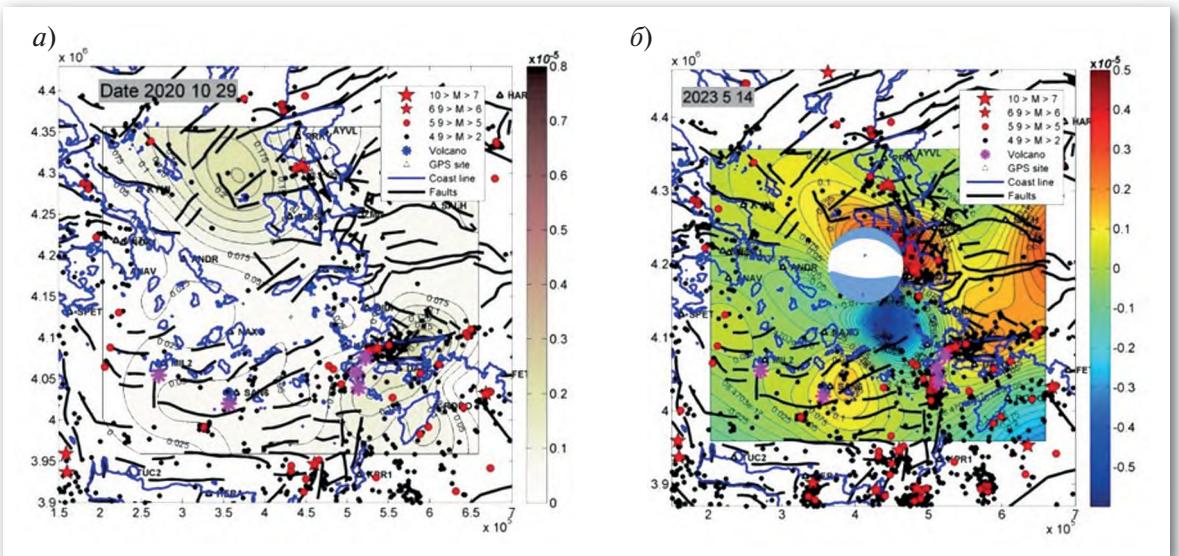


Рис. 3. Накопление деформации полного сдвига перед землетрясением Самос 2024 г.:

а — аномальные области деформации за сутки до землетрясения. б — деформация дилатации через три с половиной года после землетрясения; в центре — механизм очага главного события

Аномалия деформации полного сдвига начала развиваться, также как и накопление горизонтальных и вертикальных смещений, в области островов Санторин-Аморгос. Не многим более чем за 10 лет максимум деформации увеличился и переместился в северную и юго-восточную области акватории Эгейского моря (рис 3а). В результате землетрясения Самос эти два экстремума слились в один, с максимумом в эпицентральной зоне указанного события [3]. Это обстоятельство не противоречит гипотезе триггерного воздействия на «созревший» очаг сильного землетрясения за счет дополнительной динамической нагрузки.

Синоптический анализ деформации дилатации показал, что аномальные области растяжения в первые годы образовались на севере и западе исследуемого региона [4]. По мере их развития в 2017 г. в этих областях произошли два сильных землетрясения. Сразу после землетрясения Самос на дневной поверхности образовался деформационный квадруполь с центром на ~50 км юго-восточнее эпицентральной зоны, характерный для сдвигового разрыва большой протяженности (рис. 3б). В то же время механизм очага этого события (в центре рис. 3б) свидетельствует о сбросовом характере движений по субширотному разрыву. Интересно понять причину этого рассогласования. При этом следует иметь ввиду, что фокальный механизм описывает практически мгновенное первичное движение, тогда как данные непрерывных ГНСС-наблюдений имеют временное разрешение в одни сутки. За это время сейсморазрыв развивается в длину, возможно, меняя свою ориентировку в пространстве. В то же время, положение областей растяжения-сжатия фокального механизма согласуется с областями растяжения-сжатия деформации дилатации вблизи эпицентра землетрясения (рис. 3б).

С меньшей интенсивностью растяжение начало развиваться в области о-ва Санторин, где на десятилетие позже в феврале-марте 2025 г. произошел плотный рой землетрясений (рис. 3б). Визуальный анализ полученных результатов позволяет предположить следующее объяснение последовательности взаимосвязанных событий регионального сейсмо-деформационного процесса в связи с роем землетрясений в области островов Санторин и Аморгос. Первоначально более чем за десятилетие до проявления роя в данном районе началась аномальная подвижность земной коры, выраженная в подъемах и деформации полного сдвига. Эта аномальная деформация начала распространяться в области эпицентров будущих сильных землетрясений региона. Деформация сдвига и подъем сопровождали раскрытие тектонических разломов, которое в итоге выразилось в локализованном аномальном растяжении земной коры примерно за два года до начала беспрецедентно плотного роя слабых и умеренных землетрясений. Форма области растяжения характерна для начала внедрения магмы из подкоровых слоев. Достижение магматической интрузии верхних хрупких слоев земной коры спровоцировало возникший здесь рой сейсмических событий, завершившийся в конце марта 2025 г. Полученные результаты в совокупности с обширными и детальными комплексными геофизическими исследованиями данного района позволяют говорить о сбросе критических напряжений, за которыми может последовать сильное землетрясение, и низкой вероятности такого события.

В более широком аспекте полученные результаты свидетельствуют о том, что тектонические движения являются первичными для последующего возникновения и развития вулканической активности. Внедрение магмы в верхние слои земной коры является следствием регионального тектонического процесса.

Пространственное распределение дефицита внутренних движений после сильнейшего землетрясения Самос продемонстрировало сохранение (не полное разрушение) движений с малыми скоростями в районах о-ва Ксиос, по линии залив Сароникос — о-вов Никос и Милос, а также у побережья Турции, между о-вами Самос и Родос (рис. 2б).

Результаты наших исследований поведения дефицита движений, в разных регионах мира, позволяют говорить о том, что в этих областях опасность возникновения сильных землетрясений в ближайшем будущем сохраняется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science // Eos. 2018. V.99. <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.
2. Dokukin P., Gök E., Kaftan I., Kaftan V., Shevchuk R. Evolution of the crustal inner shear deficit in a reference to 2010–2023 Aegean Sea earthquakes // ESDB repository, GCRAS, Moscow. 2024a. <https://doi.org/10.2205/esdb-aegean-deficit>.
3. Dokukin P., Gök E., Kaftan I., Kaftan V., Shevchuk R. Evolution of the crustal total shear strain in a reference to 2010–2023 Aegean Sea earthquakes // ESDB repository, GCRAS, Moscow. 2024b. <https://doi.org/10.2205/esdb-aegean-shear>.
4. Dokukin P., Gök E., Kaftan I., Kaftan V., Shevchuk R. Evolution of the dilatation strain in a reference to 2010–2023 Aegean Sea earthquakes // ESDB repository, GCRAS, Moscow. 2024c. <https://doi.org/10.2205/esdb-aegean-dilatation>.
5. Dokukin P., Gök E., Kaftan I., Kaftan V., Shevchuk R. Evolution of the horizontal and vertical displacements in a reference to 2010–2023 Aegean Sea earthquakes // ESDB repository, GCRAS, Moscow. 2024d. <https://doi.org/10.2205/esdb-aegean-movement>.
6. Kaftan V.I., Melnikov A. Yu., Dokukin P.A. Evolution of Inner Crustal Displacement Deficit According to the GPS Data in Connection with Seismicity in the Period of 2014–2024 and the Mw=7,4 Hualien Earthquake, Taiwan // Geodynamics & Tectonophysics. 2025. V. 16. No 1. 0812. doi:10.5800/GT-2025-16-1-0812.
7. Kaftan V., Melnikov A. Migration of Earth Surface Deformation as a Large Earthquake Trigger. In: Kocharyan G., Lyakhov A. (eds) Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2019. P. 71–78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_8.

ПРИРОДНЫЕ ОПАСНОСТИ НА КАМЧАТКЕ: ИССЛЕДОВАНИЯ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ

Х. В. Алферова¹, Т. М. Маневич¹, О. В. Соболевская²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

²Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
Единой геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

NATURAL HAZARDS IN KAMCHATKA: RESEARCH AND SYSTEMATIZATION

H. V. Alferova¹, T. M. Manevich¹, O. V. Sobolevskaya²

¹Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch, RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

²Kamchatka branch of the Federal Research Center
of the Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Представлена информация о природных опасностях полуострова Камчатка. Комплексными исследованиями и систематизацией этих событий и их последствий занимаются ведущие научные учреждения Камчатского края: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра геофизической службы РАН, Камчатское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Information about natural hazards of the Kamchatka Peninsula is presented. Leading scientific institutions of the Kamchatka Territory are engaged in comprehensive research and systematization of these events and their consequences: Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch, RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, Kamchatka Branch of the Federal Research Center of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Kamchatka Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

По уровню угрозы возникновения природных катастроф Камчатка относится к наиболее опасным регионам России и мира. Наряду с «обычными» природными опасностями для центральных регионов страны, на полуострове наибольшую угрозу представляют извержения вулканов, землетрясения и цунами.

Историческая информация о подобных событиях на полуострове появилась с началом освоения Камчатки только в конце XVII в. Первые сведения дошли до нас в виде дневников исследователей полуострова, но регулярные наблюдения и их систематизация начались немногим более века назад.

В Курило-Камчатском регионе расположено более 7000 вулканических построек, из них 68 признаны активными (рис. 1). Ежегодно происходят извержения от 3 до 8 вулканов.

В составе Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН функционирует Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT — Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team), которая была создана в 1993 г., в тесном сотрудничестве с Камчатским филиалом Геофизической службы Российской Академии наук (КФ ФИЦ ЕГС РАН) и Аляскинской Вулканологической Обсерваторией (AVO).

KVERT проводит ежедневный видео-визуальный и спутниковый мониторинг вулканов. В настоящее время круглосуточные видеонаблюдения осуществляются за наиболее активными и потенциально опасными вулканами (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Авачинский, Корякский, Горелый, Мутновский, Камбальный, Крашенинникова).

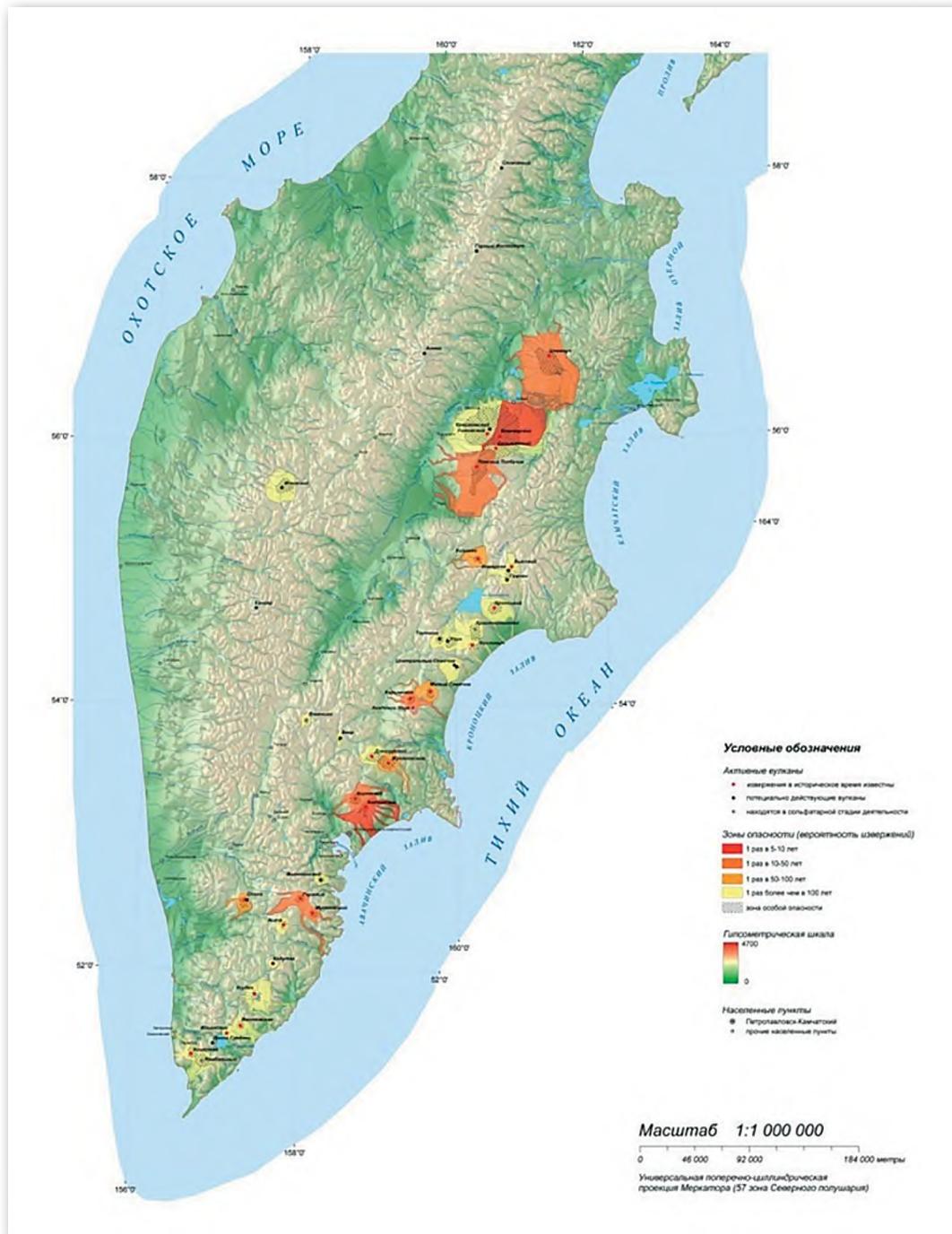


Рис. 1. Карта вулканической опасности полуострова Камчатка

Спутниковый мониторинг проводится с помощью самых современных информационных технологий — в информационной системе «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил (VolSatView)», позволяющей с помощью различных спутниковых систем отслеживать в реальном времени перемещения пепловых облаков от вулканов, подготовку извержений и т. д. [1].

В настоящее время KVERT является официальным и полномочным источником информации о вулканической деятельности в Российской Федерации для международных аэронавигационных служб и пользователей воздушного пространства.

На сайте ИВиС ДВО РАН размещен каталог действующих вулканов Камчатки и Курильских островов [2], а также еженедельно публикуется прогноз опасности вулканов. В организации создана и геоинформационная система, включающая в себя интерактивные карты вулкано- и лахароопасности.

В Камчатском филиале Федерального исследовательского центра геофизической службы РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН) ежедневно ведется работа по сбору, обработке и представлению сейсмической информации. Это позволяет своевременно оценивать сейсмическую обстановку в регионе и делать выводы, в том числе, и о вулканической опасности. Сейсмологический мониторинг обеспечивает непрерывные круглосуточные наблюдения в режиме реального времени. На основании многолетних накопленных данных создана фактографическая база данных «Мониторинг вулканической активности» [3] (рис. 2), в состав которой входят сейсмические, видео-, визуальные и спутниковые наблюдения. При этом основной целью деятельности КФ ФИЦ ЕГС РАН является выполнение фундаментальных и прикладных научных исследований в области проблем сейсмологии и геофизики, а также в проведении непрерывного сейсмического мониторинга Камчатки и Дальнего Востока Российской Федерации, сопредельных территорий и мира.

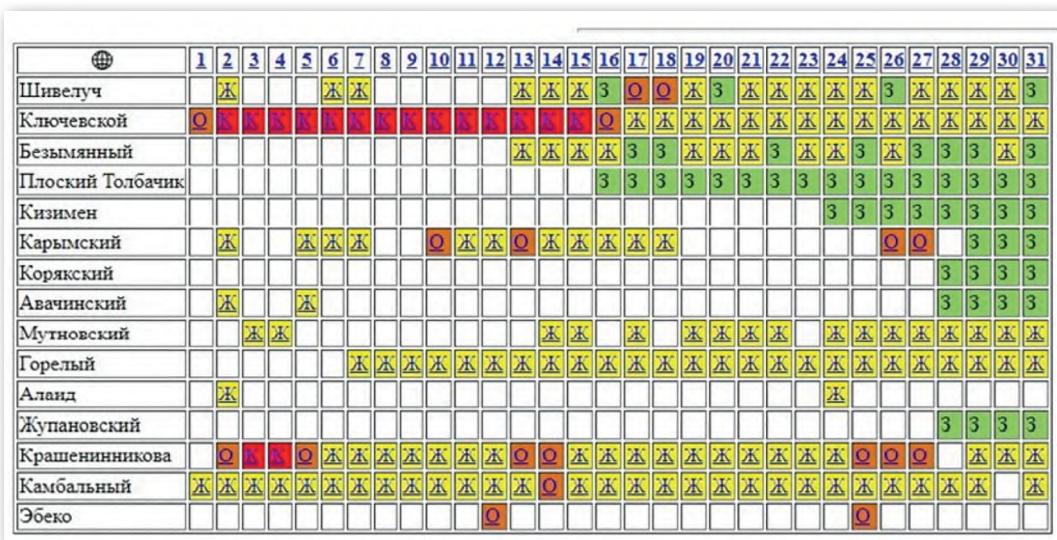


Рис. 2. Мониторинг вулканической активности, август 2025 год*:

*зеленый — вулкан в спокойном состоянии; желтый — сейсмичность выше фоновой, наличие пепла в выбросах, наличие термальных аномалий; оранжевый — большое количество локальных землетрясений, лавовые потоки, высота пепловых выбросов до 8 км над уровнем моря; красный — сильные землетрясения регистрируются на удаленных станциях, высота пепловых выбросов больше 8 км над уровнем моря; белый — отсутствие данных

Для систематизации и хранения информации обо всех землетрясениях, происходящих в Курило-Камчатском регионе, создана также Единая информационная система сейсмологических данных. На ее основе создана интерактивная карта землетрясений. Организация ведет наблюдения и за подводными землетрясениями в районах Тихого океана и обеспечивает взаимодействие с учреждениями Росгидромета в области оценки цунамиопасности.

Помимо прямой угрозы жизни населения от извержений и землетрясений для региона характерно и воздействие на прибрежные районы волн цунами. За исторический период (около 260 лет) задокументировано 14 только катастрофических цунами.

В Камчатском управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) функционирует центр наблюдения и предупреждения о цунами. Он полу-

чает информацию от сети автоматических пунктов и взаимодействует с сейсмологическим информационно-обрабатывающим центром геофизической службы РАН, а также с центрами международной Тихоокеанской системы предупреждения цунами [4]. В круглосуточном режиме работает региональная система предупреждения о цунами (СПЦ). При событиях в ближней зоне (1000 км для Петропавловска-Камчатского) ответственность за принятие решений и объявления тревоги цунами возложена на ГС РАН. На базе полученных многолетних данных составлен атлас цунами и карта цунамиопасности для прибрежных районов (рис. 3).

Природные катастрофы на Камчатке возникают и будут возникать в будущем. Для предупреждения населения об опасности и уменьшения тяжелых последствий природных катастроф необходимы постоянный мониторинг опасных природных явлений, накопление данных о них, научные исследования их природы и поиск средств снижения опасности.

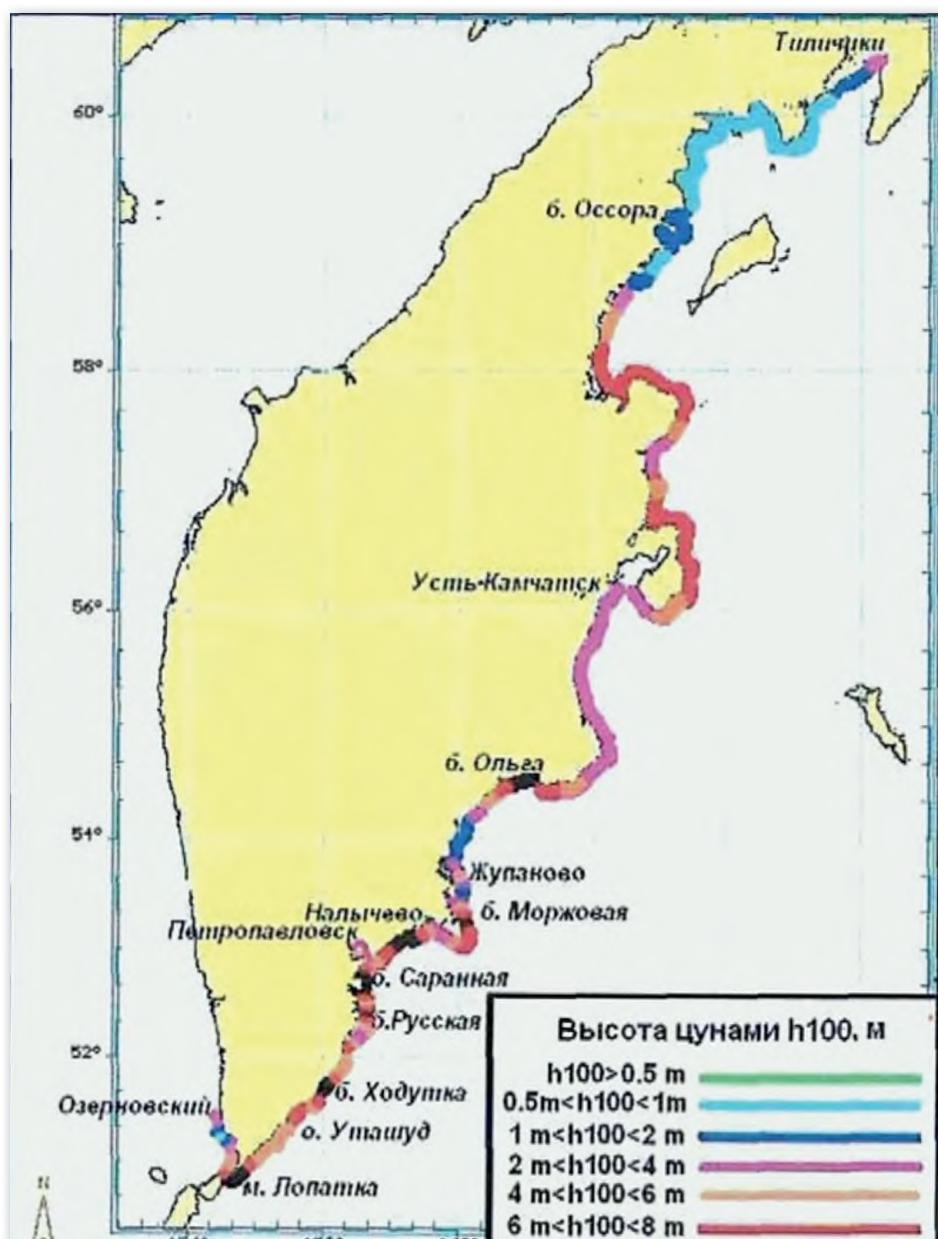


Рис. 3. Карта цунамиопасности для прибрежных районов Камчатки

В процессе подготовки материалов на Камчатке произошла масштабная природная катастрофа. 30 июля 2025 г. в 150 км от г. Петропавловска-Камчатского (52,31 с. ш., 160,73 в. д., глубина 32 км) произошло землетрясение MW-8,8. По геофизическим данным оно явилось сильнейшим в камчатской сейсмофокальной зоне с 1952 г. К середине сентября количество афтершоков приблизилось к 13000. Максимальные смещения земной коры наблюдались в южной части полуострова: горизонтальные — почти 2 м, вертикальные — на десятки см.

Землетрясение вызвало цунами в ряде стран Тихоокеанского огненного кольца: США, Японии, Китае. Максимальная высота волн, более 6 м, наблюдалась на юго-восточном побережье Камчатки, островах Парамушир и Шумшу.

В первую неделю августа усилилась и вулканическая деятельность. Вошли в активную фазу извержения вулканы Карымский и Ключевской. Началось первое историческое извержение вулкана Крашенинникова, активизировался район вулканов Камбальный и Кошелева.

Изучение последствий вулканической деятельности явилось демонстрацией взаимодействия и комплексной работы всех вышеперечисленных служб.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.ksclnet.ru/ivs/> (Электронный ресурс).
2. <http://kvert.febras.net/> (Электронный ресурс).
3. <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm> (Электронный ресурс).
4. <https://kammeteo.ru/> (Электронный ресурс).

**СЕТЬ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ
КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ОПАСНЫХ ДЛЯ РАЙОНА
г. ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО:
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ**

*Е.В Полтавцева^{1,2}, В.А. Гаврилов^{1,2}, д-р физ.-мат. наук,
Ю.Ю. Бусс¹, Ю.В. Морозова¹,
И.А. Сагаряров^{1,2}, О.В. Федористов^{1,2}*

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

²Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

**THE NETWORK OF COMPLEX GEOPHYSICAL MONITORING
OF PROCESSES OF PREPARATION
OF STRONG KAMCHATKA EARTHQUAKES DANGEROUS
FOR THE AREA OF PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY:
CURRENT STATE AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT**

*E. V. Poltavtseva^{1,2}, V. A. Gavrilov^{1,2}, Dr. Sc.,
Yu. Y. Buss¹, Yu. V. Morozova¹,
I. A. Sagaryarov^{1,2}, O. V. Fedoristov^{1,2}*

¹Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

²Vitus Bering Kamchatka State University,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Сеть комплексных скважинных измерений функционирует на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона в непрерывном режиме более 20 лет с целью мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений. Измерения в достаточно глубоких скважинах позволяют получать научные результаты, не достижимые при измерениях на дневной поверхности. Привлечение дополнительных видов геофизического мониторинга увеличивает точность анализа данных.

A network of multi-instrumental borehole measurements has been operating on the territory of the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon in a continuous mode for more than 20 years in order to monitor the preparation of strong Kamchatka earthquakes. Measurements in sufficiently deep boreholes make it possible to obtain scientific results that are unattainable with measurements on the daytime surface. The involvement of additional types of geophysical monitoring increases the accuracy of data analysis.

Комплексные скважинные геофизические измерения проводятся Институтом вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (ПГП) непрерывно с августа 2000 г. Район ПГП расположен в зоне с высоким уровнем сейсмичности и с многочисленными активными разломами. Созданная на территории ПГП уникальная сеть комплексных скважинных измерений (далее — Сеть) дает возможность проведения перспективных фундаментальных научных исследований в области изучения эндогенных процессов, связанных с подготовкой сильных землетрясений. На данный момент в Сеть комплексных скважинных

измерений входят пять радиотелеметрических пунктов, созданных на базе скважин, и Центр сбора и обработки данных, расположенный в здании ИВиС ДВО РАН. Проводимые на базе Сети исследования ориентированы на задачи мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды, отражающих процесс подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива. Основные измерения на пунктах Сети проводятся с использованием датчиков, установленных в скважинах глубиной до 2542 м, что позволяет получать научные результаты, не достижимые при измерениях на земной поверхности [1]. Важной особенностью Сети является комплексность проводимых измерений. Для мониторинга процессов подготовки камчатских землетрясений используются данные девяти видов измерений (рис. 1).

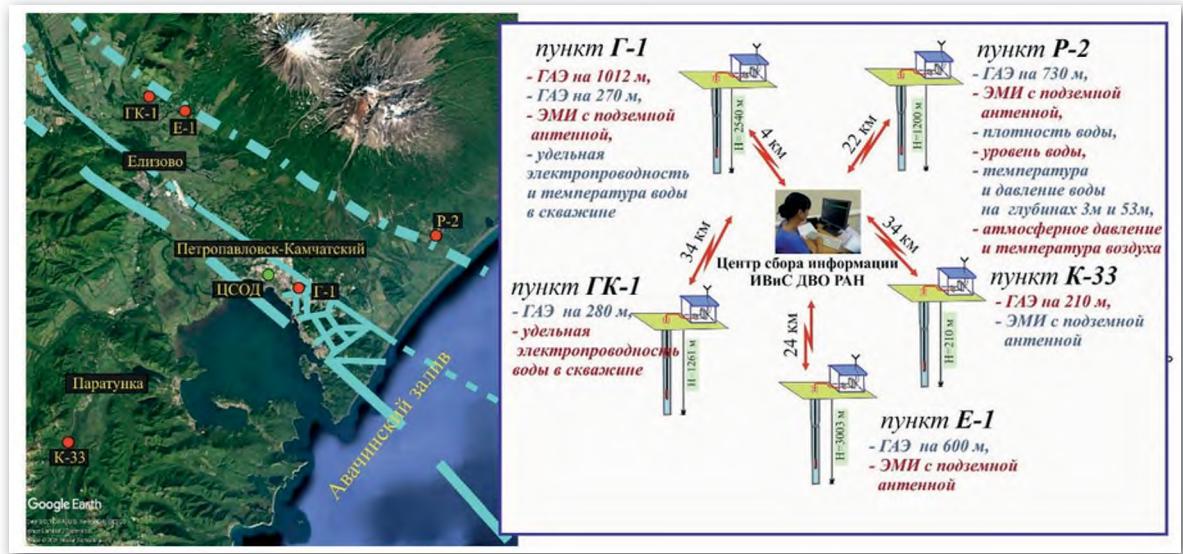


Рис. 1. Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона:
красными кружками на карте обозначены пункты скважинных измерений;
зеленый кружок — Центр сбора и обработки данных (ЦСОД) в здании ИВиС ДВО РАН

Основой аппаратурного комплекса каждого пункта Сети является измерительный контроллер, в функции которого входит аналого-цифровое преобразование измеряемых сигналов, их цифровое осреднение, привязка данных к точному времени по UTC, а также хранение массивов обработанных данных для их дальнейшей передачи по каналу связи в Центр сбора и обработки данных. Принятые массивы данных измерительных пунктов автоматически вносятся в базу исходных данных в виде временных рядов.

Базовыми видами измерений являются электромагнитные измерения (ЭМИ) с подземными электрическими антеннами и геоакустические (ГАЭ) измерения в глубоких скважинах. При проведении геоакустических измерений используются аналоговые геофоны двух типов, установленные в скважинах на глубинах от 270 до 1012 м, а также аналоговые и цифровые гидрофоны. Электромагнитные измерения проводятся с использованием подземных электрических антенн разных конструкций: это высокочувствительная подземная электрическая антenna типа «монополь» с подземным рефлектором, а также подземная электрическая антenna собственной разработки, не требующая подземного рефлектора, что позволяет проводить измерения в условиях городской застройки.

На основе данных этих измерений разработаны уникальные высокочувствительные методы мониторинга изменений состояния НДС геосреды перед сильными близкими

землетрясениями [2]. Физической основой ГАЭ-метода является эффект модуляции интенсивности геоакустической эмиссии. При достаточной влажности геосреды воздействие на геоакустические процессы слабого электромагнитного излучения СНЧ диапазона с медленно меняющейся амплитудой напряженности электрического поля будет вызывать изменения амплитуды ГАЭ. Данный метод связан с оценкой изменений амплитуд геоакустических откликов геосреды на внешнее электромагнитное воздействие.

ЭМИ-метод базируется на данных непрерывного мониторинга изменений удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород. При этом в качестве зондирующего сигнала используется непрерывное фоновое электромагнитное излучение техногенного или природного происхождения, а в качестве датчиков — подземные электрические антенны. Физической основой метода является зависимость УЭС горных пород от степени их влажности.

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты комплексных геофизических измерений во временной окрестности Вилючинского ($M_w \geq 6,5$) и Шипунского ($M_w \geq 7,0$), произошедших в Авачинском заливе в 2023–2024 гг.

Сеть комплексных геофизических наблюдений фактически является информационной основой системы средне- и краткосрочного прогноза сильных камчатских землетрясений. С января 2014 г. лабораторией комплексного мониторинга сейсмоактивных сред ИВиС ДВО РАН регулярно на основе данных Сети подготавливаются заключения о текущей сейсмической опасности для района г. Петропавловска-Камчатского.

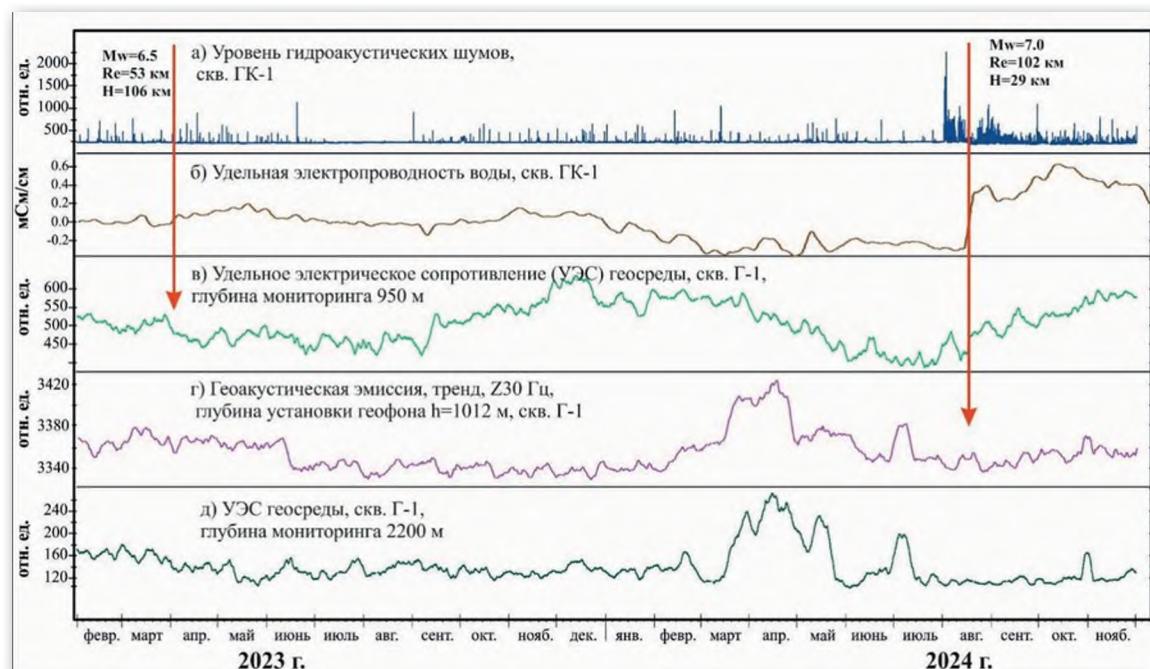


Рис. 2. Характер изменений рядов данных комплексных геофизических измерений во временной окрестности сильных близких землетрясений с $M_w \geq 6,5$ (Авачинский залив, 2023–2024 гг.):

- изменения уровня гидроакустических шумов (газонасыщенности воды) в скв. ГК-1;
- изменения удельной электропроводности воды в скв. ГК-1; в) изменения УЭС геосреды по данным измерений с подземной электрической антенной, 160 Гц, глубина мониторинга 950 м, скв. Г-1;
- тренд ГАЭ, канал Z, 30 Hz, глубина установки геофона 1012 м, скв. Г-1;
- изменения УЭС геосреды по данным измерений с подземной электрической антенной, 30 Гц, глубина мониторинга 2200 м, скв. Г-1. Красными стрелками указаны моменты землетрясений, эпицентрические расстояния определялись относительно пункта Г-1, расположенного в г. Петропавловске-Камчатском

Заключения подаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, а также в Совет по прогнозу землетрясений и извержений вулканов ИВиС ДВО РАН. На основе данных Сети были сделаны успешные прогнозы ряда сильных камчатских землетрясений, в том числе прогноз сильного близкого Шипунского землетрясения (17.08.2024 г. GMT; $M_w = 7,0$; Re = 102 км, H = 29 км), вызвавшего в г. Петропавловске-Камчатском сотрясения силой 5–6 баллов (ШСИ-17).

Комплексность измерений дает возможность сравнивать данные, полученные по разным видам мониторинга, обеспечивая тем самым высокую достоверность результатов. Успешным оказался опыт привлечения дополнительных видов геофизического мониторинга, базирующихся на результатах наблюдений с помощью Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Это, прежде всего, данные о движениях и деформациях земной коры, отражающие процессы растяжения и сжатия в районе ПГП, а также мониторинг полного электронного содержания ионосферы, позволяющий зафиксировать возмущения в оклоэпицентральной зоне будущего события за несколько суток до землетрясения [3, 4].

Для дальнейшего развития Сети планируется увеличить количество пунктов мониторинга удельного электрического сопротивления геосреды, что позволит надежнее оценивать магнитуду готовящихся землетрясений. Также необходимо расширение сети ГНСС: установка дополнительных пунктов позволит улучшить точность интерпретации данных скважинных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов В.А., Дещеревский А.В., Власов Ю.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В., Федористов О.В., Денисенко В.П. Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57. № 3. С. 52–78.
2. Гаврилов В.А. Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН, 2017. 385 с.
3. Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Титков Н.Н., Пантелейев И.А., Бусс Ю.Ю. Мониторинг изменений напряженно-деформированного состояния геосреды в районе Петропавловского геодинамического полигона по данным комплексных скважинных и GPS-измерений на активной фазе подготовки Жупановского землетрясения (30.01.2016; Mw=7,2) // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14, № 6.
4. Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Сагарьяров И.А., Бусс Ю.Ю. О связи изменений полного электронного содержания ионосферы перед сильными камчатскими землетрясениями с изменениями удельного электрического сопротивления геосреды // Геодинамика и тектонофизика. 2025. 16 (4): 0837. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-4-0837>.

**ПОДХОДЫ К КРАТКОСРОЧНОМУ ПРОГНОЗИРОВАНИЮ
СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ОПАСНЫХ ДЛЯ РАЙОНА
Г. ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО.
УСПЕШНЫЙ ПРОГНОЗ ШИПУНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
(17.08.2024 г., $M_w = 7,0$, $RE = 102$ км, $H = 29$ км)**

*В. А. Гаврилов^{1,2}, д-р физ.-мат. наук, Е. В. Полтавцева^{1,2},
Ю. Ю. Бусс¹, Ю. В. Морозова¹, И. А. Сагаряров^{1,2}*

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

²Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

**APPROACHES TO SHORT-TERM PREDICTION
OF STRONG EARTHQUAKES DANGEROUS
FOR THE PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY AREA.
SUCCESSFUL PREDICTION OF THE SHIPUNSKOE EARTHQUAKE
(AUGUST 17, 2024, $M_w = 7,0$, $RE = 102$ km, $H = 29$ km)**

V. A. Gavrilov^{1,2} Dr. Sc., E. V. Poltavtseva^{1,2},

Yu. Y. Buss¹, Yu. V. Morozova¹, I. A. Sagaryarov^{1,2}

¹Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

²Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

В статье поясняются ключевые позиции подхода авторов к среднесрочному и краткосрочному прогнозированию сильных камчатских сейсмических событий на основе данных комплексного геофизического мониторинга, в том числе необходимость наличия развитой непрерывно функционирующей сети мониторинга; использование при анализе получаемых результатов базовой физической модели подготовки землетрясения; необходимость организации службы прогноза и другие аспекты.

The authors explain the key positions of the approach to the medium- and short-term prediction of strong Kamchatka seismic events based on data from integrated geophysical monitoring. It emphasizes the need for a well-developed continuously functioning monitoring network, the use of a basic physical earthquake preparation model, the organization of a forecasting service, and other aspects.

Начиная с 2000 г. на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (ПГП) функционирует постоянно действующая сеть комплексного геофизического мониторинга, включающая в себя различные виды наблюдений, проводимых ИВиС ДВО РАН [1]. Данные, поступающие с измерительных пунктов сети, представляют собой информационную основу для регулярных прогнозных заключений о сейсмической опасности для г. Петропавловска-Камчатского и его окрестностей. За двадцатипятилетний срок проведения геофизических наблюдений на территории ПГП сформировались основные позиции подхода к краткосрочному прогнозированию сильных камчатских землетрясений, которые можно выразить в следующих тезисах:

1) прогноз с высокими требованиями к надежности и точности прогнозируемых параметров землетрясения в настоящее время маловероятен; вместе с тем на данном этапе исследований в большинстве случаев возможна оценка вероятности сильных (выше 6 баллов) сотрясений на ближайшие дни-недели;

2) прогноз с «мягкими» требованиями к точности и с качественной оценкой вероятности прогнозируемого события реален и, безусловно, необходим;

3) обоснованное среднесрочное и краткосрочное прогнозирование землетрясений невозможно без наличия в контролируемом районе сети комплексных геофизических наблюдений, способной обеспечивать непрерывный мониторинг процессов подготовки близких сильных землетрясений;

4) анализ результатов комплексных геофизических наблюдений должен проводиться в рамках выбранной для соответствующего сейсмически активного района базовой физической модели подготовки землетрясения.

Основной объем данных геофизического мониторинга на территории ПГП получен на радиотелеметрических измерительных пунктах, созданных на базе глубоких скважин (Г-1 в районе г. Петропавловска-Камчатского, Р-2 недалеко от территории Халактырского пляжа и побережья Тихого океана, ГК-1 в Елизовском районе). Базовыми видами наблюдений являются непрерывные геоакустические измерения на различных глубинах, электромагнитные измерения с подземными электрическими антennами и мониторинг удельного электрического сопротивления (УЭС) геосреды, мониторинг концентрации метана в воде и удельной электропроводности (УЭП) воды [1].

Анализ многолетних рядов геофизических наблюдений показал, что подготовка сильных камчатских землетрясений, отраженная в данных сети комплексного геофизического мониторинга, достаточно хорошо соответствует модели консолидации И. П. Добровольского. Стадийность, представленная в консолидационной модели, включает в себя стадию формирования в геосреде жесткой неоднородности, которая затем распадается, формируя положение магистрального разрыва [2]. Распад неоднородности сопровождается интенсивным трещинообразованием, небольшими землетрясениями (форшоками), проявлением краткосрочных предвестников.

При наличии достаточно чувствительной сети комплексного геофизического мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды начало стадии распада неоднородности через определенное время начнет проявляться в предвестниковых аномалиях по различным видам измерений (т. н. «активная фаза подготовки»). Характерный признак активной фазы — рост степени согласованности (по своему физическому смыслу) вариаций регистрируемых параметров для различных видов мониторинга НДС геосреды.

По данным сети комплексных скважинных измерений для наиболее сильных по величине параметра S землетрясений продолжительность интервала активной фазы составила 8–10 месяцев. Здесь S — процентное отношение длины очага землетрясения к гипоцентральному расстоянию [3]. К моменту написания данной работы максимальное значение за весь период наблюдений составляло $S = 58\%$ для Шипунского землетрясения, произошедшего 17 августа 2024 г. ($M_w = 7,0$, $R_h = 102$ км) и вызвавшего сотрясения в городе до 6 баллов. Однако в июле 2025 г. в районе Авачинского залива произошли сильнейшие сейсмические события со значениями S , превышающими 100%, отражение подготовки которых в данных сети комплексного геофизического мониторинга является предметом отдельных работ.

По данным мониторинга изменений УЭС геосреды среднесрочное прогнозное заключение о возможной сейсмической опасности было сформулировано в конце декабря 2023 г. На рис. 1 представлены изменения УЭС геосреды по данным измерений с подземной электрической антенной на скважине Г-1 (частота измерений 160 Гц, глубина мониторинга 950 м) [4]. Можно видеть, что перед всеми сильными камчатскими землетрясениями со значением параметра S выше 20% наблюдались значительные изменения

УЭС геосреды (падения уровня), и те изменения, которые отразились в данных на рис. 1 перед Шипунским событием, не стали исключением. В рамках модели консолидации подобные изменения УЭС на разных глубинах могут объясняться перестройкой геосреды при формировании и разрушении жесткой неоднородности с соответствующей интенсификацией фильтрационных процессов.



Рис. 1. Долговременные изменения УЭС геосреды (160 Гц, 950 м) по данным электромагнитных измерений на скв. Г-1:

желтым фоном выделены временные интервалы подачи прогнозных заключений о повышенной вероятности землетрясения с $S \geq 18\%$

В качестве дополнительных видов измерений для анализа процессов, протекающих в геосреде при подготовке сильных камчатских землетрясений, используются также данные ГНСС-сетей. В частности, в настоящее время проводится мониторинг изменений полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы по данным ГНСС-приемников. Вариации ПЭС ионосферы на заключительных стадиях подготовки землетрясения позволяют не только зафиксировать наступление указанной стадии, но и в ряде случаев локализовать околоэпицентральную область будущего землетрясения. ПЭС ионосферы — количество свободных электронов в столбе единичного сечения, направленного вдоль луча зрения «приемник-спутник», рассчитанное по методике, подробно описанной в [5], с использованием данных ГНСС-приемников и файлов навигационных сообщений спутников.

Существует зарегистрированный эффект возмущений ПЭС ионосферы на заключительных стадиях подготовки сильных землетрясений. Результаты наблюдений показывают, что подобные изменения в значительной степени коррелируют с изменениями УЭС геосреды верхнего слоя (до 1 км) земной коры в соответствующей подионосферной области.

На рис. 2 показано расположение использованных в работе ГНСС-станций совместно с пунктами скважинных измерений на базе скважин Г-1 и Р-2. Все станции, кроме РЕТТ, принадлежат Камчатской ГНСС-сети КФ ГС РАН, РЕТТ — станция Федеральной

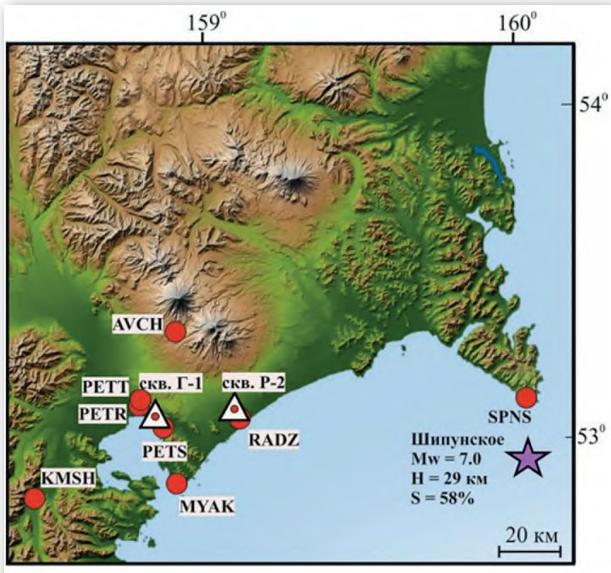


Рис. 2. Расположение ГНСС-станций (красные кружки), пунктов скважинных измерений Г-1 и Р-2 (треугольники): звездочкой отмечен эпицентр Шипунского землетрясения ($M_w = 7,0$, $S = 58\%$)

Перед построением двумерной интерполированной карты все полученные абсолютные значения ПЭС ионосфера проходят обязательную предобработку — чистку грубых выбросов, среднемедианное сглаживание в скользящем окне. Перед интерполяцией методом кубических сплайнов на карту наносятся подионосферные точки (проекции точек пересечения луча «приемник-спутник» с F2-слоем ионосферы на высоте максимума ионизации), формирующие подионосферные траектории. Каждой точке в соответствие ставится определенное для нее значение вертикального ПЭС согласно цветовой шкале [6]. Временной ряд вариаций ПЭС проходит обязательную коррекцию от влияния геомагнитной и солнечной активности [6].

На рис. 3 а представлена эволюция распределения возмущений Δ ПЭС (процентные отклонения от геомагнитно-спокойного дня 01.08.2024 г. со значением геомагнитного индекса $Dst \approx 4$) для темного времени суток 22:00–05:00 LT в окрестности эпицентра землетрясения. Видно значительное повышение уровня ПЭС на большой территории, охватывающей всю окрестность эпицентра землетрясения. Рис. 3 б отражает изменения ПЭС ионосферы в темное время суток в сопоставлении с изменениями в различных геофизических полях накануне Шипунского землетрясения. Так, с 1 августа 2024 г. уровень гидроакустических шумов в скважине ГК-1 вырос в десятки раз, одновременно с этим значительно возрос уровень удельной электропроводности воды.

На рис. 4 более крупно показана аномалия УЭС геосреды на глубине 450 м с максимумом 14 августа 2024 г. и следующее за ней повышение уровня ПЭС ионосферы по данным ближайшей к эпицентру Шипунского землетрясения ГНСС-станции SPNS, отразившееся на картах рис. 3 а.

Показано, что анализ данных комплексных скважинных измерений в рамках выбранной физической модели консолидации дает возможность достаточно надежного

астрономо-геодезической сети. Расстояние от станции SPNS, введенной в работу 7 июля 2024 г. совместными усилиями ИВиС ДВО РАН и КФ ГС РАН, до эпицентра Шипунского землетрясения составляет всего около 23 км.

Изменения ПЭС ионосферы визуализируются в работе как путем формирования двумерной пространственной карты распределения вариаций ПЭС над указанной территорией, так и в виде временного ряда изменений ПЭС по данным выбранных станций ГНСС-сетей. В обоих случаях используются только значения ПЭС, полученные в темный период местного времени (для Камчатки это UTC+12) без затрагивания восхода-захода Солнца, чтобы максимально исключить влияние солнечного терминатора.

Перед построением двумерной ин-

терполяированной карты все полученные абсолютные значения ПЭС ионосферы проходят обязательную предобработку — чистку грубых выбросов, среднемедианное сглаживание в скользящем окне. Перед интерполяцией методом кубических сплайнов на карту наносятся подионосферные точки (проекции точек пересечения луча «приемник-спутник» с F2-слоем ионосферы на высоте максимума ионизации), формирующие подионосферные траектории. Каждой точке в соответствие ставится определенное для нее значение вертикального ПЭС согласно цветовой шкале [6]. Временной ряд вариаций ПЭС проходит обязательную коррекцию от влияния геомагнитной и солнечной активности [6].

На рис. 3 а представлена эволюция распределения возмущений Δ ПЭС (процентные отклонения от геомагнитно-спокойного дня 01.08.2024 г. со значением геомагнитного индекса $Dst \approx 4$) для темного времени суток 22:00–05:00 LT в окрестности эпицентра землетрясения. Видно значительное повышение уровня ПЭС на большой территории, охватывающей всю окрестность эпицентра землетрясения. Рис. 3 б отражает изменения ПЭС ионосферы в темное время суток в сопоставлении с изменениями в различных геофизических полях накануне Шипунского землетрясения. Так, с 1 августа 2024 г. уровень гидроакустических шумов в скважине ГК-1 вырос в десятки раз, одновременно с этим значительно возрос уровень удельной электропроводности воды.

На рис. 4 более крупно показана аномалия УЭС геосреды на глубине 450 м с максимумом 14 августа 2024 г. и следующее за ней повышение уровня ПЭС ионосферы по данным ближайшей к эпицентру Шипунского землетрясения ГНСС-станции SPNS, отразившееся на картах рис. 3 а.

Показано, что анализ данных комплексных скважинных измерений в рамках выбранной физической модели консолидации дает возможность достаточно надежного

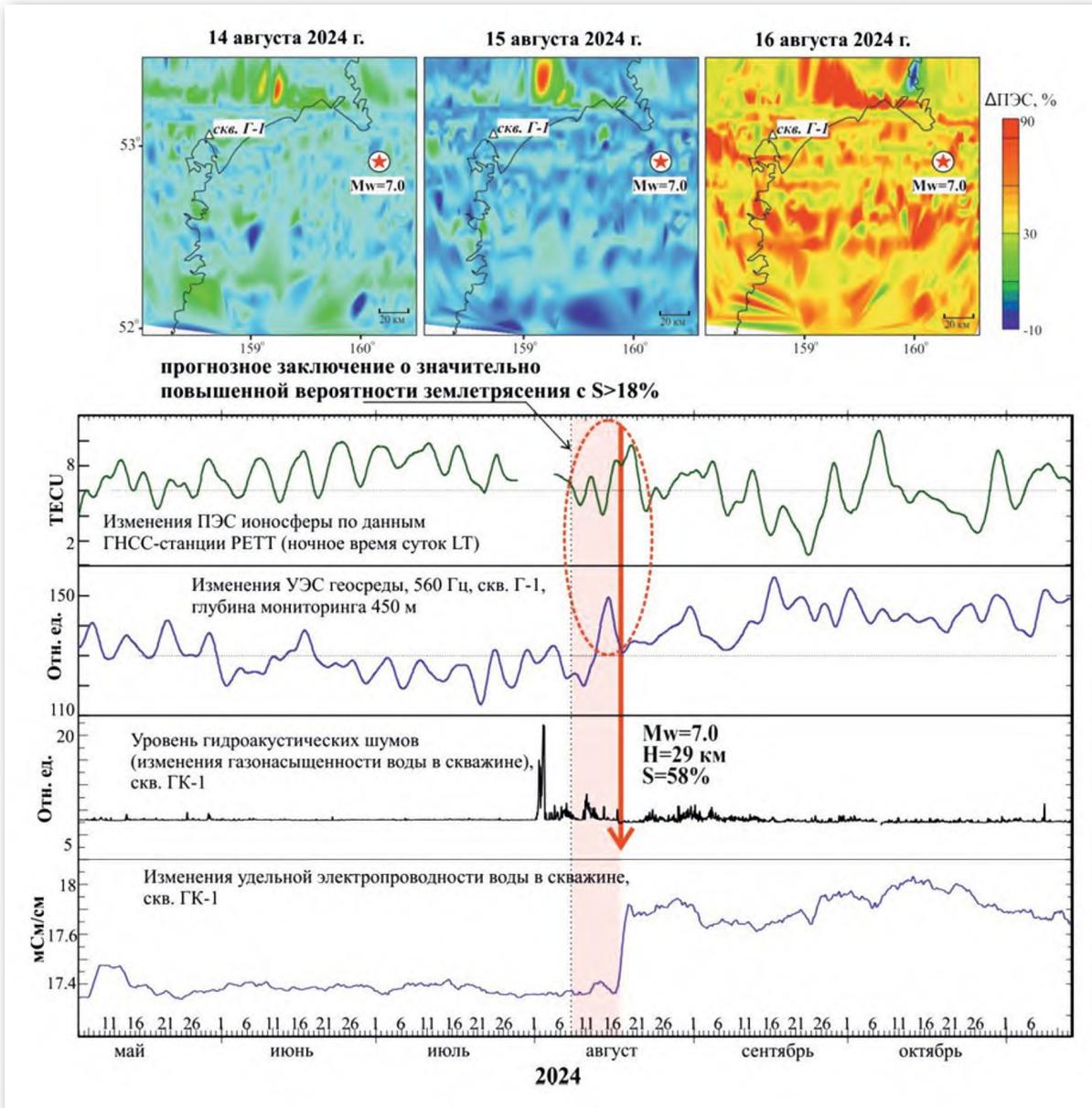


Рис. 3. Сопоставление изменений ПЭС ионосферы и данных сети скважинных измерений (УЭС геосреды, газонасыщенность, УЭП воды) перед Шипунским землетрясением

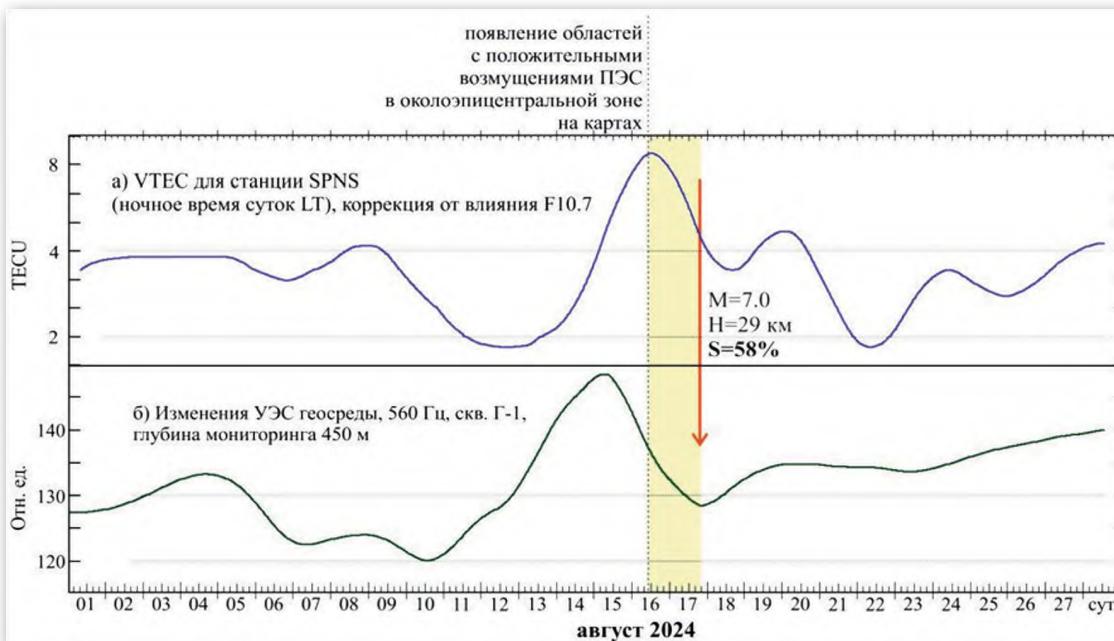


Рис. 4. Изменения в УЭС геосреды на небольших глубинах в сопоставлении с вариациями ПЭС ионосферы перед Шипунским землетрясением

выделения заключительной стадии подготовки сильных камчатских землетрясений с «мягкими требованиями» к точности. Представленные результаты указывают на возможность достаточно надежного средне- и краткосрочного прогнозирования землетрясений, исходя из результатов долговременного комплексного геофизического мониторинга изменений НДС геосреды.

ЛИТЕРАТУРА

- Гаврилов В.А., Дешчевский А.В., Власов Ю.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В., Федористов О.В., Денисенко В.П. Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57. № 3. С. 52–78.
- Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009. 240 с.
- Gavrilov V.A., Pantaleev I.A., Deshcherevskii A.V. et al. Stress-Strain State Monitoring of the Geological Medium Based on The Multi-instrumental Measurements in Boreholes: Experience of Research at the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Testing Site (Kamchatka, Russia). Pure Appl. Geophys. 2020. 177, 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>.
- Гаврилов В.А. О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 3. С. 25–38.
- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
- Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Сагарьяров И.А., Бусс Ю.Ю. О связи изменений полного электронного содержания ионосферы перед сильными камчатскими землетрясениями с изменениями удельного электрического сопротивления геосреды // Геодинамика и тектонофизика. 2025. 16 (4): 0837. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-4-0837>.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТРИГГЕРНОГО ЭФФЕКТА ВЛИЯНИЯ ПОТОКА ПРОТОНОВ НА СЕЙСМИЧНОСТЬ

А.А. Любушин¹, д-р. физ.-мат. наук,
Е.А. Родионов¹, канд. физ.-мат. наук

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE TRIGGER EFFECT OF PROTON FLUX ON SEISMICITY

А.А. Lyubushin¹, Dr. Sc., E. A. Rodionov¹, Ph.D.

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia

Для временного ряда плотности потока протонов 2000–2024 гг. в окнах длиной 5 дней рассчитаны 6 свойств и для них найдены точки локальных экстремумов. Для каждой пары экстремумов и землетрясений с магнитудой не менее 6,5 рассчитана разность между прямой мерой опережения точек экстремумов статистики потока протонов относительно моментов времени землетрясений и обратной мерой опережения с использованием модели взаимодействующих точечных процессов. Показано, что при использовании точек локальных минимумов ширины носителя спектра сингулярности 28% землетрясений с магнитудами не ниже 6,5 возникают вследствие триггерного воздействия потока протонов.

For the proton flux density time series, 2000–2024, in 5-day windows, 6 properties were calculated and local extremum points were found for them. For each pair of extrema and earthquakes with a magnitude of at least 6,5, the difference between the direct measure of the lead of the extremum points of the proton flux statistics relative to the earthquake time instants and the inverse measure of the lead was calculated using the model of interacting point processes. An estimate was obtained that when using the points of local minima of the singularity spectrum support width, 28% of earthquakes with magnitudes of at least 6,5 occur due to the trigger effect of the proton flux.

Временной ряд значений плотности потока протонов с шагом по времени 5 минут был загружен с сайта <https://soho.nascom.nasa.gov/data/data.html>. На рис. 1 представлен график временного ряда плотности потока протонов для промежутка времени с начала 2000 года по 17 октября 2024 г. Шаг по времени равен 5 минутам.

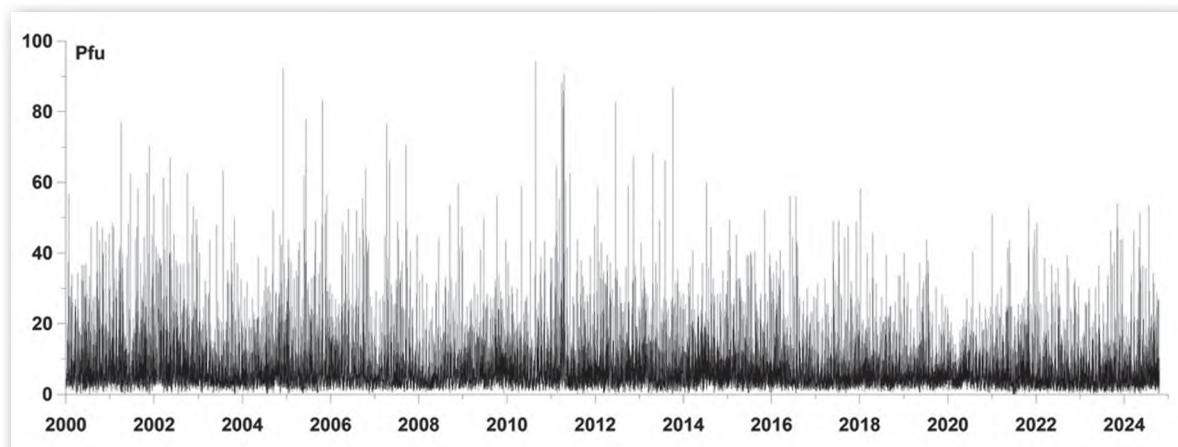


Рис. 1. График временного ряда потока протонов с начала 2000 года по 17 октября 2024 г. с шагом по времени 5 минут. Единица измерения плотности потока протонов «Pfu» означает Proton flux unit и равна $\text{particles} \times \text{cm}^{-2} \times \text{sec}^{-1} \times \text{steradian}^{-1}$

Для временного ряда плотности потока протонов в последовательных временных окнах длиной 1440 пятиминутных отсчетов (5 дней) с взаимным смещением 288 отсчетов (1 сутки) вычислялись значения 6 статистик m_x , $\lg(\kappa)$, En , γ , β и $\Delta\alpha$, описанных ниже.

Среднее значение m_x временного ряда $x(t)$ вычисляется в каждом временном окне: $m_x = \langle x(t) \rangle$, угловые скобки означают операцию вычисления среднего значения.

Коэффициент эксцесса временного ряда $x(t)$ вычисляется в каждом временном окне как $\kappa = \langle (x(t) - m_x)^4 \rangle / \langle (x(t) - m_x)^2 \rangle^2$. Мы будем использовать логарифм коэффициента эксцесса: $\lg(\kappa)$.

Минимальная энтропия временного ряда определяется формулой

$$En = -\sum_k p_k \cdot \log(p_k) / \log(N),$$

где $p_k = c_k^2 / \sum_j c_j^2$, c_k — вейвлет-коэффициенты разложения сигнала $x(t)$, N — общее число коэффициентов c_k .

Было использовано семнадцать ортогональных вейвлетов Добеши: 10 обычных базисов с минимальным носителем с числом обнуляемых моментов от 1 до 10 и 7 так называемых симлетов Добеши [1] с числом обнуляемых моментов от 4 до 10. В каждом временном окне выбирается тот вейвлет, для которого значение En минимально.

Вейвлетный индекс Донохо-Джонстона γ равен отношению «больших» по модулю вейвлет-коэффициентов к общему их числу. По определению $0 \leq \gamma \leq 1$. Порог, отделяющий «большие» вейвлет-коэффициенты, равен $\sigma\sqrt{2 \cdot \ln N}$, где $\sigma = \text{med}\{|c_k^{(1)}|, k = 1, \dots, N/2\} / 0.6745$ — робастная оценка стандартного отклонения нормального распределения, $c_k^{(1)}$ — вейвлет-коэффициенты на первом уровне детальности разложения, $N/2$ — число таких коэффициентов [1].

Вейвлетный спектральный наклон β определяется как регрессионный коэффициент зависимости логарифма суммы квадратов вейвлет-коэффициентов $\log(S_k)$ на уровне детальности k от $\log(T_k)$, где $T_k = 2\Delta s / (2^{-k} + 2^{-(k+1)})$ — период, соответствующий центру частотной полосы уровня вейвлет-разложения с номером k [1], то есть $S_k \sim T_k^\beta$, Δs — шаг по времени временного ряда плотности потока протонов, то есть 5 минут.

Ширина носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$ рассматривается как мера разнообразия стохастического поведения сигнала $x(t)$. Она определяется как $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, где α_{\min} и α_{\max} — минимальные и максимальные значения показателя Гёльдера-Липшица [2], который управляет поведением сигнала в окрестности момента времени t : $|x(t + \delta/2) - x(t - \delta/2)| \sim |\delta|^\alpha$, $\delta \rightarrow 0$. Для моно-фрактального сигнала показатель α одинаков для всех моментов времени t . Если этот показатель различается, то сигнал является мульти-фрактальным [2].

Методы оценок параметров En , γ , β и $\Delta\alpha$ в скользящем временном окне подробно изложены в [3].

За промежуток времени с начала 2000 г. по 17 октября 2024 г. произошло 1136 землетрясений с магнитудой не ниже 6,5. Дальнейший план использования статистик временного ряда плотности потока протонов заключается в оценке мер опережения

моментами времени их наиболее выразительных локальных экстремумов (наибольших локальных максимумов и наименьших локальных минимумов) относительно моментов времени землетрясений с магнитудой не ниже 6,5. При этом число точек наиболее выразительных локальных экстремумов будет выбираться равным числу сейсмических событий, то есть 1136.

Мера опережения вычисляется с помощью параметрической модели интенсивности двух взаимодействующих точечных процессов [4, 5]. Пусть $t_j^{(\alpha)}, j=1, \dots, N_\alpha; \alpha=1,2$ представляют собой моменты времен двух потоков событий. В нашем случае это: 1) последовательность моментов времени, соответствующих наиболее выразительным локальным экстремумам статистик потока протонов; 2) последовательность времен сейсмических событий с магнитудой не меньше 6,5. Представим их интенсивности в виде:

$$\lambda^{(\alpha)}(t) = b_0^{(\alpha)} + b_1^{(\alpha)}g^{(1)}(t) + b_2^{(\alpha)}g^{(2)}(t), \quad (1)$$

где $b_0^{(\alpha)} \geq 0, b_\beta^{(\alpha)} \geq 0$ — параметры, $g^{(\beta)}(t)$ — функция влияния событий $t_j^{(\beta)}$ потока с номером β :

$$g^{(\beta)}(t) = \sum_{t_j^{(\beta)} < t} \exp\left(-\left(t - t_j^{(\beta)}\right)/\tau\right). \quad (2)$$

Согласно формуле (2) вес события с номером j становится ненулевым для времен $t > t_j^{(\beta)}$ и затухает с характерным временем τ . Параметр $b_\beta^{(\alpha)}$ определяет степень влияния потока β на поток α . Параметр $b_\alpha^{(\alpha)}$ определяет степень влияния потока α на самого себя (самовозбуждение), а параметр $b_0^{(\alpha)}$ отражает чисто случайную (пуассоновскую) компоненту интенсивности. Для заданного значения параметра τ рассмотрим задачу определения параметров $b_0^{(\alpha)}, b_\beta^{(\alpha)}$. Эта задача решается методом максимального правдоподобия, что позволяет ввести в рассмотрение матрицу влияния [4, 5]:

$$\begin{pmatrix} \kappa_0^{(1)} & \kappa_1^{(1)} & \kappa_2^{(1)} \\ \kappa_0^{(2)} & \kappa_1^{(2)} & \kappa_2^{(2)} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Первый столбец матрицы (3) составлен из долей Пуассона средних интенсивностей. Диагональные элементы правой подматрицы размера 2×2 состоят из самовозбуждающихся элементов средней интенсивности, тогда как недиагональные элементы соответствуют взаимному возбуждению. Суммы составляющих строк матрицы влияния (3) равны 1.

Матрицы влияния оцениваются в скользящих временных окнах, при этом основное внимание уделяется их локальным максимумам с последующим усреднением. Пусть M_L — число длин окон в пределах от L_{\min} до L_{\max} . Таким образом, последовательность длин окон имеет вид $L_j = L_{\min} + (j-1)\Delta L, j=1, \dots, M_L$ где $\Delta L = (L_{\max} - L_{\min})/(M_L - 1)$. Каждое временное окно длины L_j скользит вдоль оси времени с взаимным смещением Δt . Пусть $t_k(L_j)$ — последовательность моментов времени, соответствующих правым концам временных окон длины L_j . Число $K(L_j)$ моментов времени $t_k(L_j)$ определяется взаимным смещением Δt временных окон длиной L_j . Пусть $(t_k(L_j), c_k^{(1)}(L_j))$

и $(t_k(L_j), c_k^{(2)}(L_j))$ — элементы $\kappa_2^{(1)}$ и $\kappa_1^{(2)}$ матрицы (3), соответствующие взаимным влияниям $2 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 2$ анализируемых моментов времени $t_k(L_j)$ для текущего положения временного окна длиной L_j . Пусть $(t_k^*(L_j), \hat{c}_k^{(\alpha)}(L_j))$, $\alpha = 1, 2$ — локальные максимумы $c_k^{(\alpha)}(L_j)$, т. е. $c_{k-1}^{(\alpha)}(L_j) < \hat{c}_k^{(\alpha)}(L_j) < c_{k+1}^{(\alpha)}(L_j)$. Выберем длину «маленького» временного интервала (мы использовали 0,1 года) и для последовательности таких интервалов вычислим средние значения $G_{2 \rightarrow 1}$ и $G_{1 \rightarrow 2}$ величин локальных максимумов $\hat{c}_k^{(\alpha)}(L_j)$.

Нашей целью является вычисление разности $\Delta G = G_{2 \rightarrow 1} - G_{1 \rightarrow 2}$. В этой формуле 1-я последовательность представляет собой последовательность моментов времени землетрясений с магнитудой не менее 6,5; 2-я последовательность представляет собой моменты времени наиболее выразительных локальных экстремумов значений свойств временного ряда плотности потока протонов. Если среднее значение $\langle \Delta G \rangle$ положительно, это означает, что имеет место триггерный эффект. В расчетах мы использовали значения $\tau = 0.05$ года, $L_{\min} = 0.5$ года, $L_{\max} = 1$ год, $M_L = 100$, $\Delta t = 1$ день. Само же значение $\langle \Delta G \rangle$ дает долю интенсивности сейсмических событий, для которых поток протонов был триггером.

При оценке мер упреждения по точкам локальных экстремумов статистик потока протонов мы тестировали как точки наибольших локальных максимумов, так и точки наименьших локальных минимумов. Выбирался вариант наибольших локальных максимумов или наименьших локальных минимумов, для которых среднее значение $\langle \Delta G \rangle$ разности между средними мерами «прямого» и «обратного» упреждения было максимальным. В результате такого перебора вариантов оказалось, что наиболее предпочтительными являются наименьшие точки локальных минимумов для статистик $\lg(\kappa)$, β , γ и $\Delta\alpha$, и наибольшие локальные максимумы для среднего значения m_x и энтропии En .



Рис. 2. График разности между средними значениями локальных экстремумов компонент матриц влияния, соответствующих «прямому» опережению временных точек локальных минимумов ширины носителя спектра сингулярности относительно моментов времени землетрясений с магнитудой не ниже 6,5 и соответствующих «обратному» опережению: синяя линия — среднее значение, справа указано числовое значение

На рис. 2 представлен график поведения разности ΔG между мерами упреждения для локальных минимумов ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$. Результаты оценок средних значений разностей мер упреждения для всех используемых статистик представлены в табл. 1.

Таблица 1

Средние значения разностей мер упреждения при использовании различных статистик временного ряда плотности потока протонов

Свойство	$(m_x)_{\max}$	$\lg(\kappa)_{\min}$	β_{\min}	γ_{\min}	$\Delta\alpha_{\min}$	En_{\max}
$\langle \Delta G \rangle$	0,17	0,26	0,25	0,23	0,28	0,26

Из табл. 1 видно, что использование точек локальных минимумов $\Delta\alpha$ обеспечивает наибольшее среднее значение. Это среднее значение, равное 0,28, можно интерпретировать как долю от средней интенсивности землетрясений, для которых поток протонов является триггером.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mallat S.A.* Wavelet Tour of Signal Processing. Second edition. 1999. Academic Press. San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, Toronto.
2. *Feder J.* Fractals, 1988, Plenum Press, New York, London.
3. *Lyubushin A.* Low-Frequency Seismic Noise Properties in the Japanese Islands // Entropy 2021, 23, 474. <https://doi.org/10.3390/e23040474>.
4. *Lyubushin A., Rodionov E.* Prognostic Properties of Instantaneous Amplitudes Maxima of Earth Surface Tremor // Entropy, 2024, 26, 710. <https://doi.org/10.3390/e26080710>.
5. *Lyubushin A., Kopylova G., Rodionov E., Serafimova Y.* An Analysis of Meteorological Anomalies in Kamchatka in Connection with the Seismic Process // Atmosphere, 2025, 16, 78. <https://doi.org/10.3390/atmos16010078>.

**ХРОНОЛОГИЯ ИЗВЕРЖЕНИЯ
ГЛАВНОГО ПУГАЧЕВСКОГО ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА
8 СЕНТЯБРЯ 2024 года (ОСТРОВ САХАЛИН)**

P. V. Жарков¹, канд. геогр. наук

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия

**CHRONOLOGY OF THE ERUPTION
OF THE MAIN PUGACHEV MUD VOLCANO
ON SEPTEMBER 8, 2024 (SAKHALIN ISLAND)**

R. V. Zharkov¹, Ph.D.

¹Institute of Marine Geology and Geophysics,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Впервые получены материалы видеонаблюдений за извержением Главного Пугачевского грязевого вулкана (о. Сахалин), позволившие достоверно проследить этапы его очередной активизации. Зафиксированное 8 сентября 2024 г. извержение грязевого вулкана началось внезапно, при взрывах фонтанирующая грязеводогазовая смесь поднималась на высоту до 15–17 м. Интенсивные выбросы и выдавливание грязевой массы из одного центра привели к формированию концентрического грязевого поля размером 135×125 м и площадью более 13000 м².

Video observations of the eruption of the Main Pugachev Mud Volcano (Sakhalin Island) have been obtained for the first time, allowing us to reliably trace the stages of its next activation. The eruption of the mud volcano, recorded on September 8, 2024, began suddenly, with explosions causing a gushing mud-water-gas mixture to rise to a height of 15–17 m. Intensive emissions and squeezing of mud mass from one center led to the formation of a concentric mud field measuring 135×125 m and covering an area of over 13,000 m².

Главный Пугачевский грязевой вулкан — наиболее активный на о. Сахалин, за период наблюдений здесь отмечено более 20 извержений различной мощности. Из-за его труднодоступности много извержений остались незафиксированными, за последние несколько лет мы отмечаем здесь от 1 до 3 извержений в год. Судя по визуальным наблюдениям очевидцев в XX в. при грязевых извержениях максимальная высота выбросов грязевой массы достигала 30–50 м, продолжительность извержений могла достигать от нескольких часов до трех дней (с перерывами, как например, 29–31 августа 1952 г.). При взрывах вместе с грязью выбрасывается газо-водяная смесь, из жерла растекаются грязевые массы, формируя новые грязевые поля диаметром более 100 м и объемом грязи 7–25 тыс. м³ [1–7].

В сентябре 2024 г. впервые в истории изучения сахалинских грязевых вулканов был зафиксирован весь процесс извержения. Уникальные видеоматериалы, полученные с помощью находящейся непосредственно на вулкане IP-камеры, позволили достоверно проследить этапы активизации Главного Пугачевского грязевого вулкана. Наблюдаемое нами извержение произошло 8 сентября 2024 г. До 11:11:40 (по местному времени) на заросшем травянистой растительностью Восточном поле Главного Пугачевского грязевого вулкана ничего не предвещало активизации. В 11:11:43 в центральной части поля началось поднятие, в 11:11:48 поле резко поднялось на 1–2 м. Высота первого выброса грязеводогазовой смеси достигала 10 м при диаметре около 20 м (рис. 1).



Рис. 1. Первая эксплозия при извержении на Восточном поле Главного Пугачевского грязевого вулкана (08.09.2024 г., о. Сахалин)

В следующие 8 секунд наблюдалась серия непрерывных выбросов на высоту до 15–17 м над поверхностью поля. При этом, судя по раскачиванию мачты с камерой, происходили слабые колебания грунта, выбросы сопровождались громким шумом, схожим с ревом мощного водопада. При эксплозиях и между ними из центра извержения выдавливались порции грязевой массы, которая волнами быстро растекалась, образовав за первые 20 секунд извержения свежее грязевое поле диаметром > 50 м (рис. 2).



Рис. 2. Эксплозии и формирование нового грязевого поля на Главном Пугачевском грязевом вулкане

Последующие эксплозии происходили практически непрерывно в течение 50 минут, высота выбросов достигала 10–15 м, площадь грязевого поля постепенно увеличивалась, достигнув максимальных размеров в 12:04 по местному времени. Постепенно частота и высота выбросов грязевой массы уменьшалась, к 17:12 высота не превышала 3–5 м, до 18:34 произошло еще несколько выбросов на высоту 2–3 м (рис. 3). В 18:35 извержение закончилось, сформировалось новое грязевое поле с концентрически зональной структурой вокруг центра извержения и комковато-ячеистой поверхностью.

Грязевое поле несколько вытянуто в юго-западном направлении, его размеры с юго-запада на северо-восток составляют 135 м, с северо-запада на юго-восток — 125 м, площадь



Рис. 3. Финальная стадия извержения Главного Пугачевского грязевого вулкана

поверхности — 13473 м². Мощность извергнутой грязевой массы в центральной части достигает 2 м относительно прежней поверхности поля, а во фронтальной части мощность составляет 30–50 см. По топографическим данным объем грязевой массы поля оценен в 11,5 тыс. м³. В реальности объем выброшенной при этом извержении грязи несколько больше, т. к. свежая грязь сильно продавливает подсохшую, но при этом пластичную приповерхностную часть предыдущего грязевого поля апрельского извержения 2021 г. Даже на периферии видно, как фронтальная часть уходит вглубь относительно поверхности «старого» поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уэда М. Грязевой вулкан Магунтан / Ред. М. М. Шукевич. Новоалександровск: Фонды ИМГиГ ДВО РАН, 1938. 31 с.
2. Чернышевская З. А. О грязевых вулканах в южной части Сахалина // Сообщение Сахалинского комплексного научно-исследовательского института СО АН СССР. Южно-Сахалинск, 1958. Вып. 6. С. 118–130.
3. Сирый И. М. Грязевые вулканы Южного Сахалина — вероятные спутники нефтяных и газовых месторождений // Геология и геофизика. 1962. № 7. С. 66–75.
4. Ильев А. Я., Сапрыгин С. М., Сирый И. М. Извержение Пугачевского грязевого вулкана в 1967 г. // Известия Сахалинского отдела географического общества СССР. 1970. № 1. С. 92–99.
5. Ершов В. В., Мельников О. А. О необычном извержении Главного Пугачевского газоводолитокластитового («грязевого») вулкана на Сахалине зимой 2005 г. // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 26. № 4. С. 69–74.
6. Мельников О. А. О динамике и природе Пугачевской группы газоводолитокластитовых («грязевых») вулканов на Сахалине по данным визуальных наблюдений и орогидрографии // Вулканология и сейсмология. 2011. № 6. С. 47–59.
7. Жарков Р. В., Козлов Д. Н. Активность Пугачевских грязевых вулканов (о. Сахалин) в 2019–2021 гг. // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Тезисы докладов IV Всероссийской научной конференции с международным участием, г. Южно-Сахалинск, 6–10 сентября 2021 г. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2021. С. 100.

О РЕЗУЛЬТАТАХ ПРОМЕРОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА КОТЛОВИНЫ ОЗЕРА КИПЯЩЕЕ (о. КУНАШИР, КУРИЛЬСКИЕ о-ва) В 2023 г.

Д. Н. Козлов¹, канд. геогр. наук

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия

ABOUT THE RESULTS OF MEASUREMENTS AND MODELING OF THE RELIEF OF THE BASIN OF LAKE KIPIASHEE (KUNASHIR ISLAND, KURIL ISLANDS) IN 2023

D. N. Kozlov¹, Ph.D.

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

В работе рассмотрены предварительные результаты обработки ГИС-материалов, полученных сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН на кратерном озере Кипящее (кальдера Головнина, о. Кунашир, Южные Курильские острова) в сентябре 2023 г. Получены актуальные данные по морфометрическим параметрам котловины, впервые составлена ее высоко детализированная схема с точностью более одного метра, результаты сопоставлены с ранними работами.

The paper considers the preliminary results of processing GIS materials obtained by the staff of the IMGG FEB RAS at the Kipiashee crater lake (Golovnin caldera, Kunashir Island, Southern Kuril Islands) in September 2023. Updated data on the morphometric parameters of the basin were obtained, its highly detailed scheme with an accuracy of more than one meter was compiled for the first time, the results are compared with early work.

Вулкан Головнина расположен на юге о. Кунашир и представляет собой кальдерный пемзово-пирокластический вулкан (рис. 1), наивысшая точка кальдеры достигает отметки 547 м. Кальдера образовалась около 39 тыс. л. н. в результате мощного извержения, в ходе этого извержения было выброшено около 15 км³ андезидиатовой пирокластики [1]. Диаметр кальдеры составляет около 10 км в основании и 4,5 км по гребню, ее дно преимущественно ровное с небольшим уклоном на северо-восток, значительную часть кальдеры занимает оз. Горячее, а в ее центре расположено небольшое кратерное оз. Кипящее и два экструзивных купола — Центральный Восточный и Центральный Западный. Подобные купола имеются в северо-западной (Подушечный) и юго-восточной (Крутой) частях кальдеры [2].

Кратер, заполненный водами озера Кипящее, врезан в южную часть экструзивного купола Центральный Восточный (рис. 2). В настоящее время на периферии куполов и в озерах наблюдается газогидротермальная активность, внутри кальдеры, и на побережье выделяют шесть наземных и одно подводное гидротермальное поле.

Морфология наземной части кальдеры Головнина изучена достаточно подробно, а рельеф ее озер в разные годы исследовался в т. ч. при помощи лота несколькими научными коллективами [3–5]. В ИМГиГ ДВО РАН такие работы по проводятся с 2005 г. с использованием современных цифровых эхолотов [6, 7]. В 2020–2021 гг. сотрудниками ИВиС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) получены новые результаты, указывающие на значительные изменения морфологии котловины оз. Кипящее [8]. Цель наших работ 2023 г. — детально описать особенности морфологии оз. Кипящее и провести оценку ее динамики за последние десятилетия.



Рис. 1. Вулкан Головнина (район проведения работ), вид с юго-востока, 2023 г. Фото автора



Рис. 2. Кратерное озеро Кипящее, снимок с юго-востока, 2023 г. Фото автора

В ходе исследований на оз. Кипящее в 2023 г. нами отработано 23 эхолотных профиля со спутниковой привязкой, после обработки которых составлена актуальная цифровая модель водоема с шагом съемки 0,5 м. (рис. 3), обновлены его основные морфометрические параметры, а результаты сопоставлены с материалами, полученными сотрудниками в серии наших экспедиций, а также с данными камчатских исследователей. По данным, полученным нами в 2005 г. [6], максимальная глубина воронки озера составляла 16 м, а в 2021 г. наибольшая глубина озера уже достигала отметок порядка 25 м [8]. Анализируя полученные в 2023 г. материалы [7], стоит отметить несколько важных моментов: котловина оз. Кипящее имеет форму воронки, с существенным углублением в ее центральной части. На высоко детализированной цифровой батиметрической схеме нам впервые удалось выделить характерный донный микрорельеф, представленный пятью воронками (* на рис. 3), в каждой воронке обнаружены газогидротермальные выходы; максимальная длина зеркала озера составила 330 м, ширина — 190 м, длина береговой линии — 870 м, площадь — 0,0462 км². Максимальная глубина составила 24 м и была отмечена на небольшом участке котловины, в ее центральной части. В нашей дальнейшей работе мы планируем выяснить механизм и причины увеличения глубины оз. Кипящее. До середины 2000-х гг. она составляла 16–17 м. Измерения 2021–2023 гг. показывают максимальные глубины до 24–25 м. Очевидно, что динамика изменения морфометрических параметров этого кратерного озера является важным индикатором как прошедших, так и потенциально возможных поствулканических процессов в кальдере Головнина.

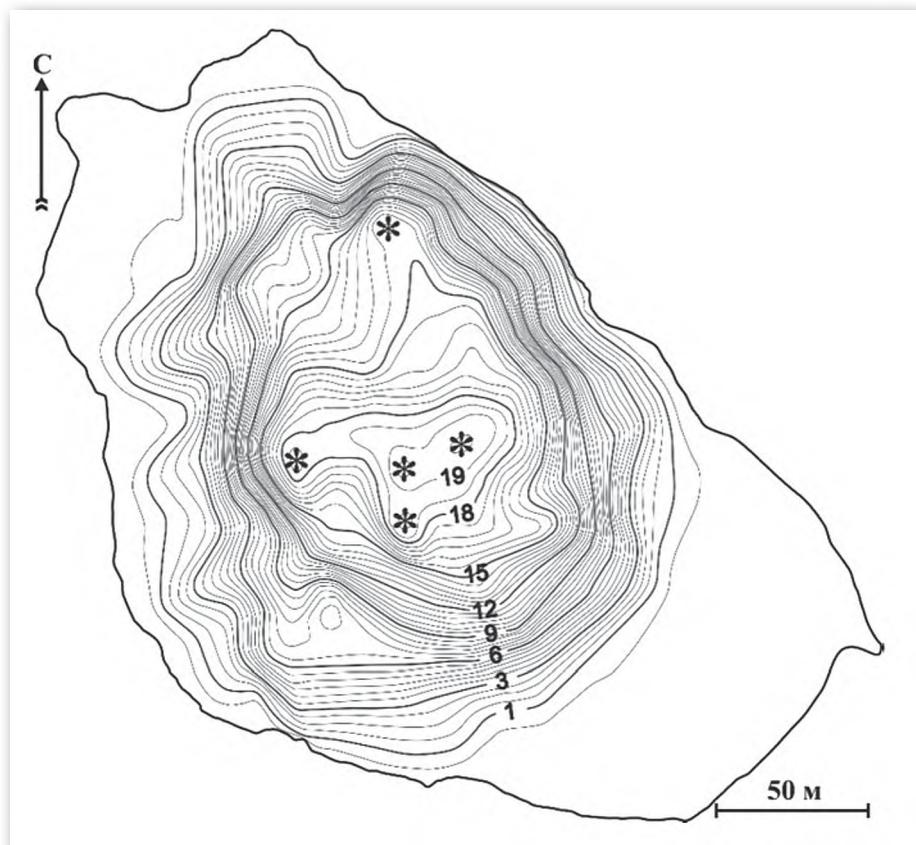


Рис. 3. Батиметрическая схема оз. Кипящее по данным 2023 г.
(авт. Козлов Д. Н., Жарков Р. В.), изобаты даны через 0,5 м,
* обозначены обнаруженные нами воронки

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН по темам «Вулканизм Сахалина и Курильских островов: мониторинг, хронология активности, вещественный состав продуктов, гидротермальные системы» (FWWM-2021-0003) и «Вулканизм Сахалина и Курильских островов: хронология, петролого-geoхимические особенности, гидротермальные проявления, мониторинг вулканической активности» (FWWM-2024-0003). Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам заповедника «Курильский» за неоценимую помощь при организации полевых работ в кальдере вулкана Головнина, особенно директору А.А. Кислейко, и заместителю директора по научной работе Е.В. Линник.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новейший и современный вулканизм на территории России / Под ред. Н. П. Лаверова. М.: Наука, 2005. 604 с.
2. Мархинин Е. К. Вулканы острова Кунашир // Труды лаборатории вулканологии АН СССР. 1959. № 17. С. 64–110.
3. Фазлуллин С. М., Батоян В. В. Донные осадки кратерного озера вулкана Головнина // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 44–55.
4. Марков А. К. Геологические условия, поиски и разведка некоторых вулканических месторождений самородной серы // Записки Горного института. 1958. Т. 33. № 2. С. 194–208.
5. Зотов А. В., Сорокин В. И., Никитина И. Б. Некоторые особенности современной гидротермальной деятельности в кальдере вулк. Головнина (о-в Кунашир). В кн.: Современные гидротермы и минералообразование. М.: Наука, 1988. С. 54–69.
6. Козлов Д. Н., Жарков Р. В. Морфология и генезис озер кальдерных комплексов Головнина и Заваринского (Курильские острова) // Вестник ДВО РАН. 2010. № 3. С. 103–106.
7. Козлов Д. Н., Жарков Р. В. Новые данные о морфологии котловины озера Кипящее (вулкан Головнина, о. Кунашир, Курильские о-ва): по результатам работ 2023 г. // Геосистемы переходных зон. 2025 Т. 9. № 2. С. 213–220.
8. Калачева Е. Г., Таран Ю. А., Волошина Е. В., Тарасов К. В., Мельников Д. В., Котенко Т. А., Эрдинцева Д. Ю. Кратерное озеро Кипящее в кальдере вулкана Головнина: геохимия воды и газов, вынос магматических летучих (о. Кунашир) // Вулканология и сейсмология. 2023. № 1. С. 3–20.

**СПЕЦИФИКА МОРФОЛОГИИ ВУЛКАНОГЕННЫХ ОЗЕР
И ГАЗОГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ
В КАЛЬДЕРЕ ГОЛОВНИНА
(о. КУНАШИР, КУРИЛЬСКИЕ о-ва) В 2024 г.**

*Д. Н. Козлов¹, канд. геогр. наук,
Р. В. Жарков¹, канд. геогр. наук*

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия

**THE SPECIFICS OF THE MORPHOLOGY OF THE VOLCANIC LAKES
AND GASHYDROTHERMAL ACTIVITY IN GOLOVNIN CALDERA
(KUNASHIR ISLAND, KURIL ISLANDS) IN 2024**

D. N. Kozlov¹, Ph.D., R. V. Zharkov¹, Ph.D.

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

В работе кратко представлены результаты исследований полевого вулканологического отряда ИМГиГ ДВО РАН, проведенных в кальдере Головнина (о. Кунашир, Курильские о-ва) в 2024 г. Выполнены детальные батиметрические промеры и картографирование оз. Горячее, даны его обновленные морфометрические параметры, выделены ранее неизвестные малые донные эксплозивные воронки. Обследованы газогидротермальные проявления, расположенные внутри кальдеры Головнина.

The paper briefly presents the research results of the IMGI FEB RAS field volcanological team conducted in the Golovnin caldera (Kunashir Island, Kuril Islands) in 2024. Detailed bathymetric measurements and mapping of the Goryachee lake were performed, updated morphometric parameters are given, and previously unknown small bottom explosive craters are identified. The gashydrothermal fields located inside the Golovnin caldera were examined.

В сентябре 2024 г. нами проведены плановые полевые работы в кальдере влк. Головнина на о. Кунашир: по апробированной методике цифровой батиметрической съемки со спутниковой привязкой профилей была проведена высокоточная эхолотная съемка озер Горячее и Кипящее; обследованы внутрикальдерные газогидротермы, и выполнены определения основных физико-химических параметров термальных вод (термальные источники и сольфатары Центрального Восточного сольфатарного поля на берегу оз. Кипящее, а также сольфатарные поля в прибрежной части оз. Горячее — Центральное Западное, Подводное, Безымянное, Набоковское и Черепаховое) (рис. 1).

Предыдущая детальная эхолотная съемка для оз. Горячее была выполнена нами в 2005 г. [1, 2]. В ходе этих работ некоторые участки озерной котловины не были покрыты достаточно плотной сеткой профилей, а часть элементов рельефа дна (воронки и т. п.) не была закартирована. Тем не менее, была получена общая картина строения дна озера, в том числе описаны его наиболее крупные эксплозивные воронки: западная с глубиной 62,3 м и размером 250×200 м и восточная с глубиной до 60 м и размером 200×150 м. В этих воронках нами были впервые зафиксированы мощные донные газогидротермальные выходы. Необходимость повторных работ в 2024 г. возникла с появлением новых данных, полученных сотрудниками ИВиС ДВО РАН в ходе исследований в 2021 г. [3, 4]. В частности ими отмечены существенные изменения глубины в воронках озера (максимальная глубина около 70 м).

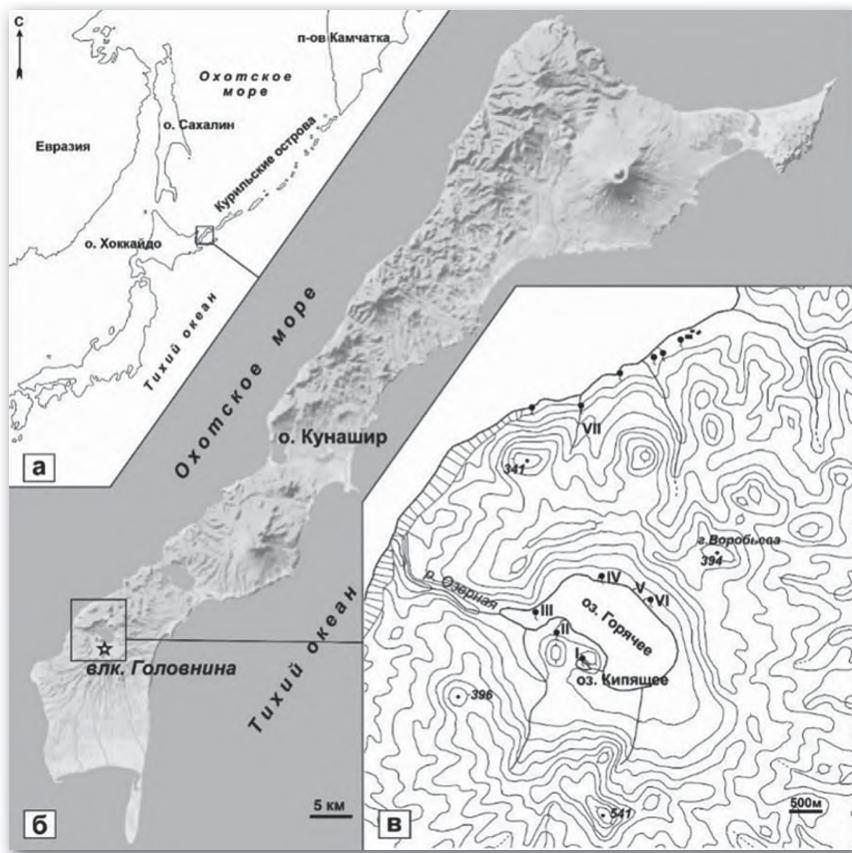


Рис. 1. Район проведения работ (о. Кунашир, Курильские острова):
 а — схематическое расположение о. Кунашир в Курильской островодужной системе; б — о. Кунашир и расположение кальдерного комплекса Головнина; в — схема термальных проявлений вулкана Головнина.

Римскими цифрами даны сольфатарные поля: I — Центральное Восточное; II — Центральное Западное; III — Подводное; IV — Безымянное; V — Набоковское; VI — Черепаховое; VII — Внешнее; значки источников без цифр — группа Алексинских термальных источников (на севере)



Рис. 2. Самовозгорание серы на южном берегу оз. Горячее и ее температура, зафиксированная термопарой. Фото Козлов Д. Н., 2024 г.

В результате наших полевых работ была составлена новая детальная батиметрическая схема оз. Горячее, получены его обновленные морфометрические параметры, в том числе выделены ранее неизвестные донные эксплозивные воронки малых размеров. Существенных изменений морфологии озерной котловины за последние 20 лет не произошло, а разница в максимальных глубинах при промерах находится в пределах погрешности измерений (глубина западной воронки составила 65 м, глубина восточной воронки — 63 м). Морфология озера Кипящее, на котором в 2023 г. нами был уточнен рельеф дна [5], к 2024 г. также не претерпела каких-либо существенных изменений. В основной воронке, формирующей облик котловины, нами выделены пять небольших воронок, в пределах которых функционируют мощные подводные газогидротермальные выходы. Максимальная глубина оз. Кипящее составила 24 м. Отметим, что в ходе полевых работ на южном берегу оз. Горячее нами впервые зафиксирован описанный очевидцами и в научной литературе пример самовозгорания серы: расплавленная сера кипела и пузырилась, а температура, по данным термопары, достигала 160–183 °C (рис. 2). В остальном на всех обследованных сольфатарных полях каких-либо существенных изменений по сравнению с нашими предыдущими работами [1, 2] не отмечено.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН по теме «Вулканизм Сахалина и Курильских островов: хронология, петролого-geoхимические особенности, гидротермальные проявления, мониторинг вулканической активности» (FWWM-2024-0003). Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам заповедника «Курильский» за неоценимую помощь при организации полевых работ в кальдере вулкана Головнина.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kozlov D. N., Belousov A. B. Hydrothermal eruption — the most probable scenario of volcanic disaster in the Golovnina Caldera, Kunashir Island, Southern Kuriles // 5th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5) and International Volcanological Field School for Graduate Students 2006. P. 140–141.*
2. *Козлов Д. Н. Кратерные озера Курильских островов. Южно-Сахалинск: Сахалин. обл. краеведч. музей, Ин-т морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2015. 112 с.*
3. *Калачева Е. Г., Таран Ю. А., Волошина Е. В., Тарасов К. В., Мельников Д. В., Котенко Т. А., Эрдинцева Д. Ю. Кратерное озеро Кипящее в кальдере вулкана Головнина: геохимия воды и газов, вынос магматических летучих (о. Кунашир) // Вулканология и сейсмология. 2023. № 1. С. 3–20.*
4. *Kalacheva E., Taran Yu., Voloshina E., Inguaggiato S. Hydrothermal system and acid lakes of Golovnin caldera, Kunashir, Kuril Islands: Geochemistry, solute fluxes and heat output // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2017. 346, 10–20.*
5. *Козлов Д. Н., Жарков Р. В. Новые данные о морфологии котловины озера Кипящее (вулкан Головнина, о. Кунашир, Курильские о-ва): по результатам работ 2023 г. // Геосистемы переходных зон. 2025. Т. 9. № 2. С. 213–220.*

РАЗДЕЛ 5

АДАПТАЦИЯ К ПРИРОДНЫМ АНОМАЛЬНЫМ ЯВЛЕНИЯМ

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПАО «ГАЗПРОМ» ПО АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА

O. E. Аксютин¹, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН

¹ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия

ACTIVITIES OF PJSC GAZPROM ON ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE

O. E. Aksyutin¹, Dr. Sc.,

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences

¹PJSC Gazprom, St. Petersburg, Russia

В статье представлена деятельность ПАО «Газпром» в сфере адаптации к изменению климата, в том числе в условиях распространения вечной мерзлоты. Описаны результаты совместных исследований с Российской академией наук, корпоративная программа адаптации с учетом климатических сценариев, инновационные технологии термостабилизации грунтов, новые строительные материалы и применяемые методы мониторинга. Отмечается важность координации деятельности научного сообщества промышленности для обеспечения устойчивости инфраструктуры и минимизации климатических рисков.

The article is devoted to the activities of PJSC Gazprom in the field of adaptation to climate change, especially in the conditions of permafrost. The results of joint research with the Russian Academy of Sciences, the development of a corporate program taking into account climate scenarios, the introduction of innovative technologies for soil thermal stabilization, new building materials, and monitoring methods are considered. It is noted the importance of coordinating the activities of the scientific community of industry to ensure the sustainability of infrastructure and minimize climate risks.

Адаптация к изменениям климата и рациональное использование природных ресурсов» является одним из семи приоритетных направлений научно-технологического развития, утвержденных указом Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529.

Первыми описали многолетнюю мерзлоту русские землепроходцы и ученые ещё в XVII в. Необходимость изучения мерзлоты была отмечена академиком В. И. Вернадским при создании Комиссии по изучению естественных производительных сил России, что в последующем заложило основы для формирования Института мерзлотоведения Сибирского отделения РАН.

При освоении газовых месторождения в 60–70 гг. XX в. были созданы соответствующие лаборатории по исследованию мерзлоты для решения проблем устойчивости инженерных сооружений, что заложило научную основу для работ по адаптации в настоящее время.

Адаптационные мероприятия закладываются на стадии проектирования каждого производственного объекта: в рамках изыскательских работ осуществляется сбор и анализ сведений о природно-климатических условиях. На основе данной информации разрабатываются мероприятия по геокриологической защите объектов [1].

Для освоения месторождений, создания и эксплуатации газотранспортной инфраструктуры в криолитозоне ПАО «Газпром» изначально применяло самые передовые технологии сохранения вечной мерзлоты, а также создавало собственные инновационные решения с привлечением профильных институтов Российской академии наук.

Инфраструктура, возводимая в криолитозоне, требует термостабилизации грунтов. Для этого применяются как традиционные решения, которые широко используются на практике, так и действительно новые и уникальные. К числу зарекомендовавших себя относятся горизонтальные и вертикальные трубчатые охлаждающие системы, вентилируемые подполья, парожидкостные термостабилизаторы и другие решения.

ПАО «Газпром» была разработана инновационная технология охлаждения газа до температуры грунта (от -2 до -10 $^{\circ}\text{C}$) перед подачей в трубопровод на основе использования смешанного холодильного агента и высокоэффективных теплообменных аппаратов, специально сооружаемых для магистральных газопроводов в зоне вечной мерзлоты.

Представляется важным при проектировании объектов использовать принцип управления мерзлотно-геологическим режимом, а не просто адаптации к нему. Это позволяет обеспечить требуемую несущую способность грунтов на протяжении всего жизненного цикла объекта.

Совместно с институтами РАН ПАО «Газпром» провело масштабные научно-исследовательские работы, экспедиционные (полевые) исследования, оценку текущего состояния климатических и экосистемных характеристик, анализ степени воздействия на территорию экзогенных процессов, выполнило районирование территорий по степени устойчивости, оценку потенциала дальнейшего развития тех или иных геологических процессов и явлений. По итогам исследований была разработана корпоративная программа с учетом вероятных сценариев климатических изменений на территориях размещения производственных объектов [2].

Важная часть адаптации к изменению климата — постоянный контроль состояния фундаментов и оснований, который включает визуальные осмотры, фотодокументирование, геодезический контроль, термометрические измерения, тепловизионную диагностику и теплопоточные расчеты. Такой подход позволяет не просто регистрировать состояние, а предсказывать поведение мерзлотного массива под воздействием внешних и внутренних факторов и предотвратить опасные инциденты, связанные с нарушением устойчивости.

В корпоративной системе мониторинга ПАО «Газпром» применяются инновационные подходы: интеллектуальные вставки газопроводов, распределенные сенсоры, технологии контроля пространственного положения на основе спутников и другие методы. По факту организован геокриологический, гидрометеорологический и геотехнический мониторинг на всех стадиях жизненного цикла: при проектировании, строительстве, эксплуатации производственных объектов.

В условиях возможного изменения климата актуальной задачей является дообустройство наблюдательных сетей новыми элементами, позволяющими повысить точность определения положения верхней границы мерзлоты, измерить деформацию грунтов дифференцировано по разрезу оснований, определить динамику промерзания и водонасыщения песчаной отсыпки. Для контроля состояния оснований в ПАО «Газпром» применяются различные технические разработки (датчики), способные учитывать

различие в типах мерзлоты. Соответствующие технические решения были разработаны и запатентованы [3].

Оперативность реагирования на изменения климата обеспечивается за счёт автоматизации сбора и обработки «больших массивов данных», технологий непрерывного контроля на основе геоинформационных систем, интеграции данных в информационные модели объектов.

В рамках геотехнического мониторинга проводится районирование по степени уязвимости территорий, создаются цифровые модели мерзлотных массивов [4]. Это позволяет принимать решения о профилактических мерах задолго до наступления критических состояний.

Один из показательных примеров по применению новых технологий по адаптации к изменению климату — мост через пойму реки Юрибей (самый длинный за Полярным кругом), который стал не только технологическим прорывом, но и примером инженерной «этики» в условиях вечной мерзлоты. Отказ от отсыпки, использование свайных опор с армированным бетоном и искусственная заморозка опор обеспечили не только устойчивость, но и минимальное воздействие на окружающую среду.

Для инструментального контроля геометрических параметров и физического состояния крупных инфраструктурных объектов, а также возможного изменения местности применяются системы дистанционного лазерного сканирования, которые позволяют отслеживать минимальные отклонения.

Важным направлением по предотвращению природных опасностей является разработка новых строительных материалов, устойчивых к большим перепадам температур, чем наблюдались ранее. Сейчас ПАО «Газпром» ведет разработку технологии получения серных бетонов на основе химического связывания свободной серы с поверхностью наполнителя (кремнезёмсодержащей породы). Данная технология имеет ряд преимуществ:

- низкая энергоемкость процесса за счет меньшего количества технологических переделов;
- меньшие выбросы в процессе производства и эксплуатации изделий;
- лучшие параметры в части пределов прочности, влагопоглощения, огнестойкости, морозоустойчивости.

Изменение климата приводит к более частому образованию дефектов бетонных конструкций. Разработки ПАО «Газпром» в области биотехнологий на основе культур уробактерий позволяют улучшать функциональные свойства биобетона: наблюдается затягивание трещин на цементном камне за счет осаждения карбоната кальция; создается бетон, который адаптируется к изменению климата.

С учетом климатических изменений на Ямале возникает необходимость улучшения строительных свойств дорожных откосов. Совместно с представителями Сибирского отделения Российской академии наук на практике опробован один из способов решения данной проблемы — технология закрепления грунтов биоразлагаемым криотропным гелем. Ранее не было практики его применения в промышленных масштабах. Исследования поверхностей электромагнитными методами контроля позволяют сделать выводы о том, что технология работает успешно.

Кроме того, ПАО «Газпром» выполнен подбор оптимального состава полимера-структурообразователя на основе природоподобных компонентов для различных типов почв, который позволяет обеспечить повышение противоэрозионных свойств грунта и одновременное стимулирование прорастания семян трав, что дополнительно укрепляет почву. Технология апробирована в полевых условиях в разных климатических зонах: на объектах ООО «Газпром добыча Надым» и ООО «Газпром трансгаз Краснодар».

Результаты апробации позволили сделать окончательный выбор рецептуры полимера-структурообразователя, которая была запатентована.

В условиях трансформации арктических ландшафтов из-за изменения климата одним из ключевых направлений повышения устойчивости почвенно-растительных сообществ является использование метанотрофных бактерий — микроорганизмов, окисляющих метан и формирующих органическую массу, которая улучшает структуру почвы и служит питательной средой для растений. ПАО «Газпром» реализует разработку целого ряда биоинженерных решений, направленных на восстановление территорий и предотвращение водно-эрзационных процессов. Применение метанотрофов позволит не только восстановить экосистемные функции, но и создать устойчивые биоценозы, адаптированные к изменению климата.

Одна из задач, которая ещё требует научного решения — это феномен бугров пучения в криолитозоне. Данные явления, возникающие в результате миграции влаги или локального накопления газа под плотными мерзлотными покровами, представляют собой комплексную проблему для любой существующей инфраструктуры. ПАО «Газпром» анализирует такие процессы, в том числе на основе космических снимков. Исторически многие озера на Ямале были сформированы на основе подобной эволюции: сначала бугор пучения, затем выход газа и заполнение котловины водой — это природное явление, повторяющееся столетиями, но с учетом изменения климата оно требует особого внимания. В настоящее время ведётся мониторинг состояния рельефа для идентификации потенциальных рисков на ранней стадии: важно совместно выработать технические решения по купированию этих явлений.

В рамках адаптации к изменению климата предлагается объединить усилия научного сообщества, промышленного комплекса и органов исполнительной власти по следующим ключевым направлениям:

- масштабирование наблюдательной сети в рамках государственных систем мониторинга, особенно в зоне вечной мерзлоты, в том числе в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» с учетом необходимости актуальных данных мониторинга при проектировании и строительстве новых объектов;
- разработка технологий предотвращения и локализации изменений, например, упреджающего реагирования на бугры пучения;
- развитие отечественных климатических моделей, обеспечивающих объективное воспроизведение природных процессов.

Опыт ПАО «Газпром» показывает, что даже при изменении климата возможно создавать безопасную и устойчивую инфраструктуру, если инженерные решения сопровождаются глубоким пониманием геологических, климатических и экологических факторов. Особую ценность приобретает консолидация усилий государства, науки и промышленности, чтобы не просто реагировать на проявления природных изменений, но и предвосхищать их, вырабатывая соответствующие технические решения. Такой научно обоснованный и прагматичный подход, а также обмен наилучшими практиками обеспечат благоприятную окружающую среду и адаптацию к изменениям климата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Осипов В. И., Аксютин О. Е., Ишков А. Г., Грачёв В. А., Сергеев Д. О. Адаптация — важнейшая технология освоения субарктических территорий России // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 1. С 56–63.

2. *Osipov V., Sergeev D., Tipenko G., Aksyutin O., Ishkov A.* Using the data of geocryological monitoring and geocryological forecast for risk assessment and adaptation to climate change // *Energies*. 2022. V. 15, № 3.
3. *Аксютин О. Е.* Научно-технические проблемы добычи, транспортировки и переработки природного газа // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89, № 4. С. 321–325.
4. *Аксютин О. Е., Недзвецкий М. Ю., Середенок В. А., Дмитрук В. В., Касьяnenко А. А., Легай А. А., Воробьев В. В., Фаткиев И. Ф., Скворцов А. А.* Результаты научно-исследовательской работы по созданию цифрового двойника геолого-технологической модели «Продуктивные пласты — скважины — газосборная сеть — пункт переключающей арматуры Южно-Русского месторождения» // *Газовая промышленность*. 2023. № S4 (857). С. 18–23.

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОПАСНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СКЛОНОВЫХ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЛАНДШАФТНОЙ ОСНОВЕ

А. В. Хомутов¹, канд. геол.-мин. наук,

М. О. Лейбман¹, д-р геол.-мин. наук

¹Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия

MAPPING OF SLOPE CRYOGENIC PROCESSES HAZARD ON A LANDSCAPE BASIS

A. V. Khomutov¹, Ph.D., M. O. Leibman¹, Dr. Sc.

¹Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia

Представлен обзор результатов применения подходов к картографированию опасности проявления склоновых криогенных процессов в тундровой зоне Карского региона на ландшафтной основе.

A review of the results of applying approaches to mapping of slope cryogenic processes hazard in the tundra zone of the Kara region on a landscape basis is presented.

С середины XX в. известна и широко обсуждается активизация криогенных процессов, связанных с вытаиванием разных типов подземных льдов на фоне тренда повышения температуры воздуха [1–5 и многие другие]. К таким процессам, в частности, относится криогенное оползание.

Основное внимание в работе уделяется криогенным оползням скольжения (КОС) и криогенным оползням течения (КОТ) [4]. КОС связаны с вытаиванием льда в основании сезонно-талого слоя, а КОТ связаны с вытаиванием залежеобразующих подземных льдов из толщи многолетнемерзлых пород. До относительно недавнего времени КОТ преобладали на морских побережьях и формировали специфические формы рельефа — термоцирки и термотеррасы [6], в то время как КОС преобладали вдали от побережий [7].

На начальном этапе разработан метод балльной оценки устойчивости ландшафтов к термоденудации, базирующийся на мониторинге отступания бровок термоцирков (ТЦ). Для этого результаты измерений отступания бровок прибрежных ТЦ Югорского полуострова в 2005–2007 гг. наложены на карту природно-территориальных комплексов (ПТК), выделенных с применением дистанционных и полевых методов [8].

ПТК были выделены по следующим признакам: степень дренированности, характер поверхности и растительного покрова, глубина сезонного протаивания. В результате расчета среднегодовой максимальной скорости отступания бровок ТЦ выделены три группы ПТК по степени устойчивости к отступанию термоденудационной бровки: неустойчивые (более 7,0 м/год), среднеустойчивые (от 4,0 до 7,0 м/год) и относительно устойчивые (менее 4,0 м/год).

Чтобы выяснить роль каждого фактора, влияющего на отступание, проведена экспертичная балльная оценка степени их влияния, основанная на встречаемости той или иной характеристики у ПТК с известной степенью устойчивости. Это позволило прогнозировать изменения скорости разрушения берегов участка исследований под действием термоденудации. Установлены факторы, влияющие на изменения скорости отступания берегов и одновременно являющиеся индикаторами устойчивости. ПТК,

не затронутые на момент исследования термоденудацией, также разделены на три группы устойчивости по принципу сравнения характеристик их компонентов с компонентами ПТК, затронутых термоденудацией согласно данным мониторинга.

За период после катастрофической активизации криогенного оползания 1989–1990 гг. на Ямале разработана теория криогенного оползания и рассмотрены механизмы и классификация криогенных оползней [9]. Результаты многолетнего изучения распространения КОС в центральной части полуострова Ямал позволили сделать прогноз вероятности их активизации на базе ландшафтной карты [10].

Для оценки влияния современных криогенных оползней скольжения по всей площади ключевого участка ПТК с рассчитанной пораженностью криогенными оползнями, сошедшими в 1989 г., были объединены в пять групп по степени пораженности: от отсутствия оползней до очень высокой пораженности (10% и более от площади ПТК).

Пораженность современным криогенным оползанием отличается в одних и тех же ПТК на разных геоморфологических уровнях. В целом наблюдается увеличение пораженности ПТК, затронутых современными КОС, от более низких уровней к более высоким. Наибольшая пораженность современным криогенным оползанием у вогнутых древних оползневых склонов и у пологих склонов с кочковатыми кустарниково-осоково-моховыми сообществами в пределах V морской равнины. В этих ПТК площадь, затронутая оползнями 1989 г., наибольшая (16 и 20% соответственно). Среди прочего это связано с тем, что у наиболее высоких поверхностей наиболее длинные склоны и, соответственно, более длинные оползни.

Экспертный анализ приуроченности, статистическая обработка количественных характеристик оползней 1989 г., анализ пораженности ПТК оползнями позволили создать карту дифференциации ПТК по степени возможного проявления КОС. ПТК были объединены в четыре группы по степени возможного проявления оползней. Максимальная вероятность проявления криогенного оползания сохраняется на вогнутых закустаренных склонах всех геоморфологических уровней. Вероятность схода крупных оползней повышается на пологих, полностью либо частично закустаренных склонах при продвижении от низких уровней к высоким. Вероятность схода мелких оползней на условно горизонтальных поверхностях повышается при увеличении их расчлененности оврагами и долинами водотоков, но явно выраженной зависимости от принадлежности этих поверхностей к тому или иному геоморфологическому уровню не прослеживается.

Таким образом, опасность криогенного оползания была впервые оценена как реакция на естественные изменения природных условий, и такая оценка базируется на анализе распространения современных оползней. Поверхности, пораженные свежими КОС, в ближайшие 300 лет не опасны, так как в основании сезонноталого слоя нет условий для формирования горизонта сильнольдистых пород — основной предпосылки возникновения КОС.

В настоящее время, на фоне резкой климатогенной активизации КОТ [11], приведшей начиная с 2012 г. к значительному увеличению числа ТЦ, приуроченных не только к морским побережьям, на полуостровах Ямал и Гыданский [12], особо актуальным стало картографирование опасности проявления КОТ, приводящих к формированию ТЦ. Это вызывает последующее значительное вытаивание залежей подземных льдов и сильнольдистых многолетнемерзлых пород.

Разрабатываемые в настоящее время принципы картографирования опасности КОТ [13] основываются на предложенной методике ландшафтной индикации глубины залегания пластовых льдов [14], результатах проанализированной активности термоцирков за три временных среза, до климатогенной активизации 2012 г., во время ее и через 5 лет после нее [15] и результатах не прекращающегося мониторинга ключевых термоцирков

в центральной части полуострова Ямал [16]. Оценка опасности КОТ отличается от оценки опасности КОС тем, что в пределах зарастающих или стабильных, в прошлом активных, ТЦ, а также стабильных КОС могут вновь сойти КОТ при увеличении суммы положительных температур воздуха за счет достижения сезонным протаиванием кровли пластового льда.

Работа выполняется Институтом криосферы Земли ТюмНИЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каплина Т. Н. Криогенные склоновые процессы. М.: Наука, 1965. 296 с.
2. Воскресенский К. С., Совершаев В. А. Роль экзогенных процессов в динамике арктических побережий // Динамика арктических побережий России. М.: МГУ, 1998. С. 35–48.
3. Кизяков А. И. Динамика термоденудационных процессов на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 1. С. 63–67.
4. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: ИКЗ СО РАН, 2007. 206 с.
5. Лейбман М. О., Кизяков А. И., Нестерова Н. Б., Тарасевич И. И. Классификация криогенно-оползневых форм рельефа для целей картографирования и прогноза // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. 69 (4). С. 486–500.
6. Кизяков А. И., Лейбман М. О., Передня Д. Д. Деструктивные рельефообразующие процессы побережий Арктических равнин с пластовыми подземными льдами // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 2. С. 79–89.
7. Leibman M. O., Khomutov A. V., Kizyakov A. I. Cryogenic Landslides in the West-Siberian Plain of Russia: Classification, Mechanisms and Landforms. In: Shan W. et al. (eds.). Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change, Environmental Science and Engineering. Springer International Publishing AG; 2014. Р. 143–162. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7_11.
8. Хомутов А. В., Лейбман М. О. Ландшафтные факторы изменения скорости термоденудации на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 4. С. 24–35.
9. Лейбман М. О. Криогенные склоновые процессы и их геоэкологические последствия в условиях распространения пластовых льдов: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Тюмень, 2005, ИКЗ СО РАН, 48 с.
10. Хомутов А. В., Лейбман М. О. Оценка опасности проявления криогенных оползней скольжения в тундре Центрального Ямала // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 2. С. 49–60.
11. Бабкина Е. А., Лейбман М. О., Дворников Ю. А., Факашук Н. Ю., Хайруллин Р. Р., Хомутов А. В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 99–109.
12. Нестерова Н. Б., Хомутов А. В., Лейбман М. О., Сафонов Т. А., Белова Н. Г. Инвентаризация термоцирков на Севере Западной Сибири по данным мозаики спутниковых снимков 2016–2018 годов // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV. № 6. С. 41–50. <https://doi.org/10.15372/KZ20210604>.
13. Хомутов А. В., Бабкина Е. А., Бурдак Д. В., Данько М. М., Левочкина О. В., Лейбман М. О., Хайруллин Р. Р. Картографирование опасности проявления склоновых криогенных процессов, приводящих к возникновению термоцирков на Центральном Ямале // Проблемы криосферы Земли. Сборник тезисов, Пущино, 2025, С. 258–259.
14. Хомутов А. В., Лейбман М. О., Андреева М. В. Методика картографирования пластовых льдов Центрального Ямала // Вестник ТюмГУ. Науки о Земле. 2012. № 7. 2012. С. 76–84.
15. Хомутов А. В., Бабкина Е. А., Хайруллин Р. Р., Дворников Ю. А. Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. 70 (2). С. 222–237. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-237>.
16. Бурдак Д. В., Хомутов А. В., Гинзбург А. П., Данько М. М., Левочкина О. В., Мареев В. А., Тарасевич И. И., Хайруллин Р. Р. Результаты мониторинга термоцирков на Центральном Ямале в 2024 г. // Проблемы криосферы Земли. Сборник тезисов, Пущино, 2025, С. 62–63.

ПРИРОДОПОДОБНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОСУШЕНИИ ЛАНДШАФТОВ ГУМИДОЙ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ

И. В. Ковалев¹, д-р с.-х. наук

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Москва, Россия

NATURE-LIKE TECHNOLOGIES IN DRAINAGE OF LANDSCAPES IN THE HUMID ZONE OF CENTRAL RUSSIA

I. V. Kovalev¹, Dr. Agricultural science

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Теоретическим обоснованием выбора технологии дренажа стало детальное изучение водного режима осушенных почв и прилегающих ландшафтов. Результаты гидрологического режима почв в течение всего вегетационного периода на основе гидрологических констант позволяют выбрать эффективный способ дренажа (траншейный или бестраншейный). Раскрыты свойства и роль вторичных вертикальных литологических образований (засыпок траншей гончарного и пластмассового дренажа), возникающих при строительстве осушительных систем, впервые это сделано в динамике за последние 30 лет.

The theoretical basis for the choice of drainage technology was a detailed study of the water regime of drained soils and adjacent landscapes. The results of the hydrological regime of soils during the entire vegetation period based on hydrological constants allow choosing an effective drainage method (trench or trenchless). The properties and role of secondary vertical lithological formations (backfill of trench ceramic and plastic drainage) that arise during the construction of drainage systems are revealed; this has been done dynamically for the first time in the last 30 years.

Развитие технологий мелиорации гумидных ландшафтов — непременное условие успешного развития сельского хозяйства в бореальной и лесостепной зонах России. Площади осушаемых земель составляют здесь в настоящее время около 6599,7 млн га, по данным Росреестра. Из них 919 тыс. га мелиорированных земель находятся в хорошем состоянии, 3230,1 млн га — в удовлетворительном, а 2450,5 млн га нуждаются в ревизии и разработке новых технологий экологического инжиниринга [1]. Анализ практического опыта демонстрирует, что самые совершенные технологии зачастую оказываются малоэффективными или непригодными вовсе, если они не учитывают свойства и режимы почв и почвообразующих пород [2].

При осушении заболоченных почв в Нечерноземной зоне используют гончарный и, в меньшей степени, пластмассовый дренаж, под действием которых возникают вторичные новые структуры — засыпки гончарного и щели пластмассового дренажа. При строительстве гончарного дренажа создается траншея шириной 40 см и глубиной до 120 см. При этом мелкозем подпахотных слоев поступает на поверхность, частично перемешивается с пахотным, и после укладки дрен засыпается обратно в траншею, обогащенный органическим веществом по сравнению с аналогичными слоями естественного сложения. При укладке пластмассового дренажа дrenoукладчики лишь прорезают почвенные горизонты шириной 12 см, не нарушая естественного сложения подпахотных слоев. Мелкозем, закладывающийся над пластмассовой дреной, обогащается гумусом лишь в результате осыпания верхних слоев. В целом на 1 га при междренном расстоянии

16 м траншейные обратные засыпки составляют 2,45%, а щелевые — 0,72% площади. Применение бестраншейного пластмассового дренажа на почвах со средней и низкой водопроницаемостью (Кф 0,1–0,3 м/сут) до настоящего времени остается дискуссионным. Отсутствие ясности в этом вопросе закрывает возможность широкого применения осушения бестраншейным пластмассовым дренажом.

Для оценки эффективности осушения минеральных гидроморфных тяжелосуглинистых почв Средней полосы России разными видами дренажа нами проведены исследования в Ступинском районе Московской области на светло-серых (агросерых) глееватых почвах («Кочкарево», N55° 06' 51" E38° 18' 32"), где в 1989 г. был создан уникальный с точки зрения возможности осуществления режимных стационарных наблюдений экспериментально-мелиоративный полигон с вариантами гончарного и пластмассового дренажа площадью 2–4 га каждый в 3-кратной повторности с междренным расстоянием — 16 м и глубиной заделки дрен 100–120 см. В качестве контроля рассматривались светло-серые глубокооглеенные и глееватые почвы (Greyic Phaozems Albic — по классификации WRB) с естественным водным режимом.

Установлено, что независимо от влажности года непосредственно после снеготаяния происходило обводнение всего профиля неосушенных почв. Во влажные годы такое состояние наблюдалось и осенью в период выпадения обильных осадков. Влажность почвы при этом находилась в интервале: предельно полевая влагоемкость — полная влагоемкость (ППВ-ПВ). В начале и середине лета влажность почвы, особенно в поверхностных горизонтах, опускалась ниже ППВ, а временами ниже 0,7 ППВ. При наличии дренажа в глееватых почвах не только устраняется двухъярусная верховодка, но обычно исчезает гравитационная влага из нижних горизонтов [1]. Влажность почвы на протяжении большей части теплого периода оказывается в оптимальном диапазоне — наименьшая влагоемкость — влажность разрыва капиллярной связи (НВ–ВРК).

Осушение вызывает глубокую трансформацию не только свойств, водного режима, резкую смену окислительно-восстановительных условий агросерых гидроморфных почв [1], но и усиливает микробиологическую деятельность в них, что подтверждается увеличением количества грибной и бактериальной биомассы [3]. Увеличение площади пика диэфиров микробного происхождения регистрируется также по данным 31Р ЯМР-спектроскопии: с 0,82% от $P_{общ.}$ — в неосушенных до 3,02% от $P_{общ.}$ — в осушенных почвах [3]. Дренаж оказывает интенсивное влияние на состав органического вещества вторичных антропогенных вертикальных образований — траншейных и щелевых засыпок, возникающих при строительстве дренажных осушительных систем. В органическом веществе мелкозема этих вертикальных новообразований всегда наблюдается резкое увеличение соотношения Сгк: Сfk по всей их толще. С гуматным составом гумуса хорошо согласуются и данные по содержанию лигнина и степени его трансформации. В светло-серых оглеенных почвах с естественным водным режимом по сравнению с их осушенными аналогами наблюдается накопление продуктов окисления лигнина и пониженная степень трансформации лигнина. Эти факты хорошо согласуются с представлениями о том, что деструкция лигнина происходит только в аэробной среде и ускоряется благодаря высокому содержанию кислорода. В восстановительных условиях лигнин слабо разрушается и происходит его относительное накопление [3]. В гумусовых горизонтах траншейных и щелевых вертикальных структур из-за более рыхлого сложения продуктивность подземной и надземной биомассы выше, что способствует увеличению содержания лигнина и степени его окисленности. В более глубоких слоях траншейных засыпок сохраняется высокая аэрация, что выражается и в значениях общего содержания лигнина и его окисленности (Т, %), при этом в щелевых засыпках данные значения наиболее выражены. Поэтому неслучайно распределение углерода в молекулах гуминовых

кислот (по данным ^{13}C ЯМР-спектроскопии, % от площади спектра) показывает накопление ароматичности в вертикальных структурах, обогащенных мелкоземом пахотного горизонта.

Важно отметить, что траншейные гончарные засыпки и щели пластмассового дренажа в серых глееватых почвах на начальном этапе последействия гончарного и пластмассового дренажа обладают значимо меньшими значениями плотности сложения (pb), по сравнению с иллювиальными горизонтами на сопоставимых глубинах (рис. 1).

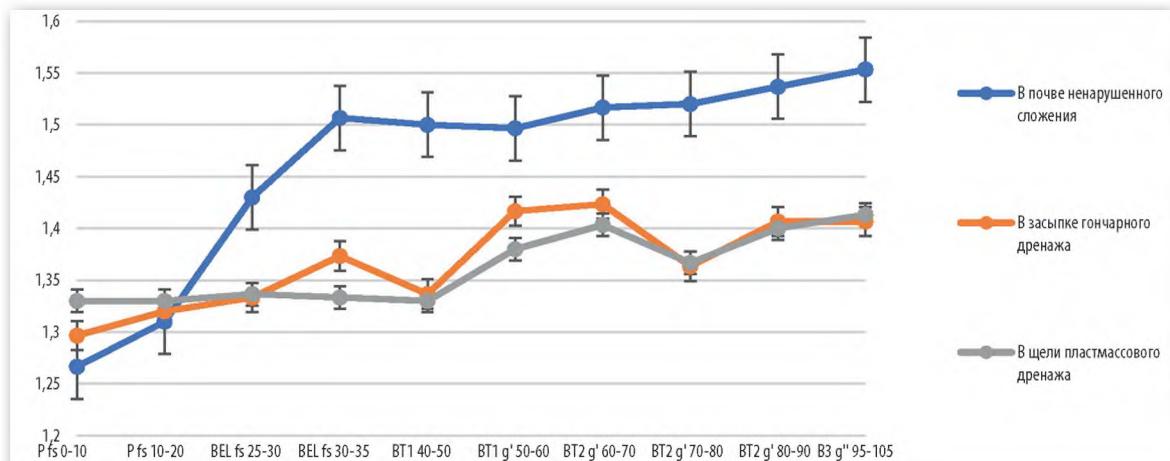


Рис. 1. Плотность почвы (pb, г/см³) в осущеной агросерой почве ненарушенного сложения, в засыпке гончарного дренажа, в щели пластмассового дренажа

Однако в слоях щели пластмассового дренажа, соответствующих иллювиальным горизонтам, плотность почвы (pb) выше, водопрочность агрегатов мелкозема ниже (рис. 2), чем в слоях засыпки гончарного дренажа, что объясняется разным содержанием мелкозема из пахотного горизонта (P_{fs}), поступившего при укладке дрен на различную глубину.

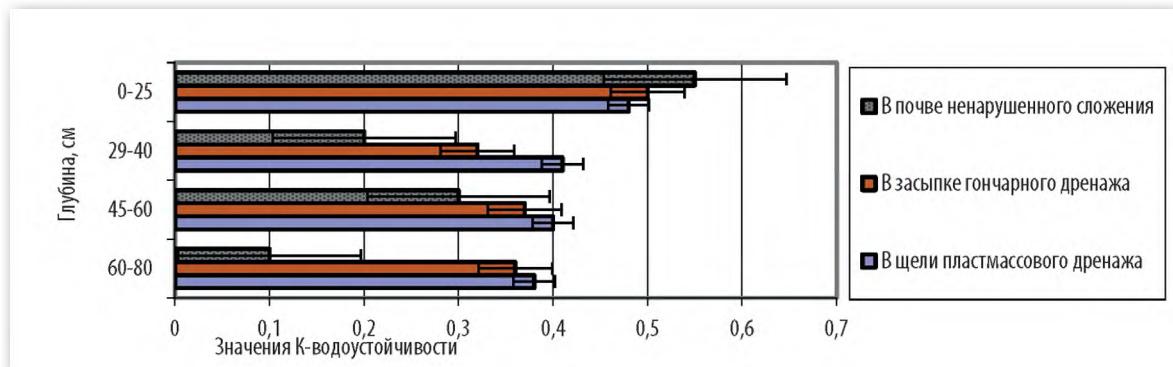


Рис. 2. Коэффициент водоустойчивости в почве ненарушенного сложения и во вторичных вертикальных структурах

Засыпки гончарного и щели пластмассового дренажа обогащаются мелкоземом пахотного горизонта, что повышает водопрочность агрегатов (рис. 2), увеличения значений коэффициента структурности и в нижних слоях засыпок не только в первые годы последействия дренажа, но и в последующие годы (в течение 30 лет).

Под воздействием осушения заметно повышаются значения Кф, установленных как методом Хануса, так и методом рам [1]. Перед строительством агросерым (светло-серым)

глееватым почвам были свойственны значения вертикальной фильтрации — 0,1–0,3 м/сут. Это низкие и средние значения Кф. После осушения почвы характеризовались средними и высокими значениями Кф. Как следствие оптимизации структурного состояния почв в траншейных и щелевых вертикальных засыпках наблюдаются повышенные величины вертикальной фильтрации (определенной по методам Хануса и Качинского) по сравнению с иллювиальными горизонтами на сопоставимых глубинах. Боковая фильтрация, определенная по методу Хануса, оказалась высокой, в то время как в почве ненарушенного сложения в иллювиальных горизонтах значения близки к водоупорным значениям (0,05 м/сут). Так на глубинах, соответствующих иллювиальным горизонтам в почвах ненарушенного сложения значения Кф варьируют в интервале 0,003–0,14 м/сут в неосушенных почвах, а боковая фильтрация в вертикальных засыпках, в частности гончарного дренажа — 0,95–3,62.

Проведенные нами исследования позволили разработать теоретическую основу и рекомендации по целесообразности и особенностям осушения полугидроморфных тяжелосуглинистых почв в гумидной зоне России в целях создания устойчивых к переувлажнению агроценозов и повышению урожайности сельскохозяйственных культур с использованием отечественных материалов и технологий. Комплексные исследования позволили ответить на основной дискуссионный вопрос о целесообразности использования пластмассового дренажа на тяжелосуглинистых почвах без применения дорогостоящих фильтрующих материалов, ограничиваясь лишь естественными природоподобными вторичными вертикальными структурами — засыпками гончарного и щели пластмассового дренажа.

Работа выполнена в рамках госзадания МГУ № 121040800146-3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kovalev I. V. Assessment of the effectiveness of different drainage systems in mineral heavy loamy soil; parameters, regimes, and requirements for drainage system reconstruction // Moscow University Soil Science Bulletin. 2024. Vol. 79. № 4. P. 438–454.
2. Kovaleva N. O., Kovalev I. V. Soil engineering: Modern challenges and development prospects // Moscow University Soil Science Bulletin. 2023. Vol. 78. № 4. P. 410–424.
3. Kovalev I. V., Kovaleva N. O. Biochemistry of lignin in soils of periodic excessive moistening (from the example of agrogray soils // Eurasian Soil Science. 2008. Vol. 41. № 10. P. 1066–1076.

ИЗОТОПНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И ПОЧВЕННО-ЛАНДШАФТНОГО МОНИТОРИНГА В БАССЕЙНЕ ОКИ: ОПЫТ ПРОШЛОГО И ВЫЗОВЫ СОВРЕМЕННОСТИ

Н. О. Ковалева¹, докт. биол. наук

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

ISOTOPIC TECHNOLOGIES FOR ECOLOGICAL AND SOIL-LANDSCAPE MONITORING IN THE OKA BASIN: PAST EXPERIENCE AND MODERN CHALLENGES

N. O. Kovaleva¹, Dr. Sc.

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

В статье рассматривается динамика природной среды в бассейне Оки в историческое время. По результатам изотопного анализа углерода органического вещества погребенных почв и культурных слоев геоархеологических памятников выявлены рубежи климатических эпох, которые отчетливо совпадают со сменой исторических культур.

This article examines the dynamics of the natural environment in the Oka River basin during historical times. Carbon isotope analysis of organic matter in buried soils and cultural layers of geoarchaeological sites revealed climatic epochs that clearly coincide with the transition of historical cultures.

Увеличение количества стихийных бедствий в разных регионах планеты привлекают все возрастающий интерес к выявлению их причин, поиску технологий прогнозирования и предотвращения природных катастроф. Поселения человека в ходе исторического времени зачастую тяготели к уязвимым с точки зрения развития природных опасностей ландшафтам пойм, береговых зон морей, озер, занимая неудобья, зандровые равнины, области активного вулканизма и горообразования, склоновые территории. Чем дальше вглубь веков, тем сильнее была зависимость поселений от природных явлений. Одной из крупнейших рек, определяющих гидрологию ландшафтов Центральной России, является впадающая в Волгу река Ока. Поэтому к ее бассейну приурочена значительная часть городищ и селищ эпохи бронзы, железа, средних веков, а также крупные современные города. Именно с динамикой русел малых рек, впадающих в Оку, во многом связана миграция культур, заселивших Русскую равнину в голоцене. Уникальным архивом информации о природной среде этого времени служат такие почвенно-аллювиальные серии, в которых в устойчивых почвенных признаках записана история событий прошлого. Цель данного исследования — с помощью изотопных методов проследить зависимость размещения поселений от динамики природных условий, на примере некоторых геоархеологических памятников в бассейне Оки.

В бассейне Оки в долинах рек Ока, Цна, Серп, Москва, Неглинная исследованы почвенные разрезы археологических памятников древних поселений (Муром, Давыдово, Никольское, Тушино, Братеево, Китай-город). Почвенно-аллювиальные серии, содержащие в верхней части стратозем на погребенной почве (аллювиальная серогумусовая почва) вскрыты в ходе комплексных экспедиционных исследований на левом берегу Москвы-реки в 100–150 м от устья р. Химки, на севере Москвы (Тушино). На территории заложения разрезов пойма невысокая, но является самой древней из исследованных. Дневной стратозем на погребенной почве (аллювиальная дерновая почва) вскрыт и на юге Москвы на правом берегу Москвы-реки (Братеево). Под ними обнаружены гумусовые

горизонты разного генезиса: дерново-подзолистые, погребенные темногумусовые, пахотные горизонты и культурные слои. Дмитровское городище во Владимирской области в районе г. Мурома приурочено к среднему течению р. Оки. На территории археологических памятников исследованы: разрезы стратозема на погребенной почве (руководитель комплексной экспедиции — А. Л. Александровский), содержащие материал культурных слоев. Исследованные разрезы Дмитровского городища приурочены к первой и второй террасам поймы Оки. В различных ландшафтах пойм рек Цны и Серп в ходе комплексных экспедиций Тамбовского государственного университета (руководители работ — В. В. Канищев, С. И. Андреев) заложены катены почв на территории Никольского и Давыдовского городищ. Катена из пяти почвенных разрезов: стратозем на погребенной почве, чернозем гидрометаморфизованный, чернозем осоложденный, аллювиальная темногумусовая почва и чернозем сегрегационный — заложена на территории села Давыдово (Моршанский район). Катена из трех почвенных разрезов: чернозем осоложденный, стратозем на погребенной почве и дерновая почва — на территории Никольского городища (Тамбовский район).

Изотопный анализ углерода органического вещества почв был выполнен на изотопном масс-спектрометре Thermo-Finnigan Delta V Plus; определение радиоуглеродного возраста выполнялось жидкостным сцинтилляционным методом в Киевской радиоуглеродной лаборатории.

По данным радиоуглеродного датирования гумуса почв было обнаружено, что формирование почв в поймах Оки, Москвы, Цны датируется VIII–IX вв. н. э., в то время как возраст дневных гумусовых горизонтов на водоразделах — 2500–2600 л. н., возраст погребенных культурных слоев в поймах колеблется от 1800 до 11000 (табл. 1). Периоды формирования культурного слоя соответствуют этапам педогенеза, а его погребение связано с активизацией процессов седиментогенеза.

Таблица 1
Результаты радиоуглеродного датирования почв

Почва, горизонт, глубина	Возраст ^{14}C , лет назад	Почва, горизонт, глубина	Возраст ^{14}C , лет назад
Стратозем на погребенной почве, Тамбовский Вал, гор. [A] 250–260 см	2510 ± 50 Ki-17408	Стратозем на погребенной почве, Давыдовское городище, гор. [A] 195–202 см	3290 ± 90 Ki-17742
Темно-серая глеевая, Матырская дубрава, гор. А 23–47 см	2680 ± 80 Ki-17409	Стратозем на погребенной почве, Давыдовское городище, гор. [A] 25–35 см	$101 \pm 1,5$ Ki-17743
Стратозем на погребенной почве, Никольское городище, гор. [A] 15–25 см	1210 ± 70 Ki-17410	Стратозем на погребенной почве, Тушино, [At] 210 см, (Александровский, 2004)	11780 ± 290 IGAN-2319
Чернозем сегрегационный, Пашня, гор. Ар 0–25 см	1640 ± 60 Ki-17740	Стратозем на погребенной почве, Тушино, [AE] 178–183 см, (Александровский, 2004)	5460 ± 160 IGAN-2320
Чернозем сегрегационный, Пашня, гор. А 25–50 см	3320 ± 100 Ki-17741	Стратозем на погребенной почве, Тушино, [A(E)] 110–140 см, (Александровский, 2004)	1780 ± 80 IGAN-2321
Токаревский район, у д. Кусты, Черноземно-луговая почва, А 0–10 (Самойлова, 1981)	2370 ± 300	Токаревский район, у д. Кусты, Луговый солонец, В 50–60 (Самойлова, 1981)	7160 ± 100
Токаревский район, у д. Кусты, Черноземно-луговая почва, [A] 50–60 (Самойлова, 1981)	6760 ± 90		

Радиоуглеродные датировки в погребенных почвах в пойме Москвы-реки схожи с датировками в поймах р. Цны, Серп и Оки (в разрезах Давыдовского и Дмитровского городищ). Средние века: Никольское — 1200 л. н., Муром — 1200 л. н. (археологическая датировка). Железный век: Тушино — 1780 л. н. Бронзовый век: Давыдово — 3300 л. н., Тушино — 5400 л. н., Муром — 3500 л. н. (археологическая датировка).

Кривые распределения изотопов $\delta^{13}\text{C}$ по профилям исследуемых почв обнаруживают, что культурные слои и погребенные почвы геоархеологических объектов формировались в различные климатические эпохи, которые отчетливо совпадают со сменой исторических культур в бассейне Оки. При этом этапы педогенеза сопровождаются развитием культур бронзового, железного и средних веков. Так, длительный сначала умеренно холодный и влажный, а затем все более теплый и сухой период стабилизации поверхности, понижения уровня грунтовых вод, ослабления процессов седиментогенеза, активного почвообразования и заселения речных долин человеком диагностируется в атлантический период голоцен — VI—VII тыс. лет назад. Медно-каменный век в Тамбовской области по характеру увлажнения соответствует современному типу фотосинтеза с величинами $\sigma^{13}\text{C}$ ($-26,3\%$). Средние значения $\delta^{13}\text{C}$ в периоды бытования и развития культуры эпохи энеолита составляет — $25,8\%$. Эпоха формирования черноземовидной почвы в пойме р. Цны и текстурно-дифференцированного профиля в пойме Москвы-реки (Тушино) приходится именно на период медно-каменного века и неолита. Описанная аллювиальная луговая почва в результате последующей активизации паводкового и аллювиального процессов была перекрыта бурым пролювием (результат овражной эрозии), а также озерными глинами с пониженными величинами изотопного отношения ($-25,9\%$), фиксирующими усиление увлажненности климата, активизацию эрозионных процессов и паводковых явлений в пойме р. Серп на рубеже культур энеолита и бронзы. В подобных условиях повышения уровня грунтовых вод балки были обводнены, реки усиленно мандрировали. В ландшафтах Пощеня активно формируются характерные для этого региона ландшафты «кустов» на солодах или осолоделых почвах.

Начало эпохи бронзы отличается более сухим и умеренным климатом ($-25,9\%$) на территории Тамбовщины. В пойме Москвы-реки ($-25,4\%$) в этот период начинается выжигание пойм. Появляется пыльца и обугленные семена сорной растительности. Состав угольного пула отражает набор пород, произраставших в пойме во время перерывов в хозяйственном использовании [1]: это ельники, смешанные елово-широколиственные леса и вязовники с участием ивы. Горизонты срубной культуры изобилуют остатками обугленной древесины во всех разрезах. В Давыдовском городище $\delta^{13}\text{C}$ в погребенных горизонтах конца бронзового века составляет — $25,55\%$, в почвах Дмитровского городища в Муроме это время характеризуется значениями $-25,5$ — $-25,2\%$. В Тушино значения $\delta^{13}\text{C}$ периода начала бронзового века равны $-25,4\%$ и соответствуют распространению древесной и луговой растительности С-3 типа фотосинтеза.

Пришедший на смену влажному эпизоду железный век и римское потепление отличается еще более засушливым периодом климатической истории региона ($-25,1\%$), нежели эпоха бронзы. В профиле разреза сформировался чернозем, вмещающий культурные слои эпохи железа. В этапы аридизации климата уменьшалась мощность гумусовых профилей, нарастала засоленность почв в депрессиях рельефа, в результате чего их покидала древесная растительность, и степи продвигались к северу вместе с насеявшими их кочевниками. Из-за усилившейся аридизации чаще возникали пожары, леса не возобновлялись, на выгоревших пространствах усиливалась плоскостная эрозия почв. Уровень грунтовых вод в ландшафтах городищ был понижен, русло рек удалялось от городищ, создавая удобные броды-перелазы для нападавших кочевников, и оборонительные рвы нуждались в углублении и укреплении.

Самые тяжелые значения изотопного отношения наблюдаются в средние века (-24%), диагностируя сухие и теплые условия почвообразования черноземного типа. Интенсивная аллювиальная аккумуляция веществ в долинах рек отсутствовала и не нарушала почвообразования. Климат был суше современного, уровень грунтовых вод опустился ниже сегодняшних значений, преобладал выпотной тип водного режима. В средние века величины $\delta^{13}\text{C}$ составляют: в почвах Давыдовского городища $-25,48\%$, в Никольском $-25,5\%$, в Муроме $-25,5\%$, в Китай-городе -23% , что связано с началом активного освоения территорий.

Влажный малый ледниковый период приходит на смену средневековому климатическому оптимуму, изотопные отношения выравниваются до значений $-27,4\%$, в поймах регистрируется этап активного седиментогенеза. Изотопный состав органического вещества в погребенных почвах разных регионов однотипен и характерен для растительности с С-3 типом фотосинтеза. Малый ледниковый период ярче проявляется в почвах южной тайги и менее контрастен в лесостепи.

Современные изотопные соотношения в природных ландшафтах пойм р. Оки, Цны и Москвы равны в среднем -26% , что характеризует более гумидные условия. Антропогенное освоение пойм приводит к вырубке деревьев, понижению уровня грунтовых вод, и иссушению пойменных ландшафтов ($\delta^{13}\text{C}$ в разрезе стратозема на погребенной почве Китай-города -23%).

Таким образом, полученные изотопные данные отражают этапы почвообразования и седиментогенеза, которые накладываются на этапы развития археологических культур. Эти данные соответствуют направлению эволюции почв междуречных пространств бассейна Оки, что не противоречит сведениям глобальных схем изменения климата, хотя и обнаруживает закономерные зональные различия в почвах пойм р. Неглинной, Оки, Цны, Серп и Москвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ershova E. G., Alexandrovskiy A. L., Krenke N. A. Evolution of landscapes of the Moscow River floodplaine in the Atlantic and Subboreal: pedological and palynological records //Catena. 2016. № 137. P. 611–612.*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ КАК ЗАДАЧА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

П. П. Хачикян^{1, 2}, канд. техн. наук

¹НИУ «ВШЭ», Москва, Россия

²ООО «ГОСОБОРОНЗАКАЗ», Москва, Россия

ENSURING FOOD SECURITY IN EMERGENCY SITUATIONS AS A DECISION-MAKING CHALLENGE UNDER CONDITIONS OF DEEP UNCERTAINTY

P. P. Hachikyan^{1,2}, Ph.D.

¹HSE University, Moscow, Russia

²LLC «STATE DEFENSE ORDER», Moscow, Russia

Рассматривается проблема обеспечения продовольственной безопасности (ПБ) государств в условиях воздействия внешних факторов — чрезвычайных ситуаций (ЧС). Проведен анализ влияния на ПБ негативных событий, вызванных: природными явлениями, эпидемиями вирусов, вооруженными конфликтами, терроризмом. Предложен сценарный подход обеспечения ПБ в условиях ЧС как задачи принятия решений в условиях глубокой неопределенности, для которой характерно отсутствие как достаточных вероятностных данных о возможности наступления событий, так и о масштабах последствий.

The problem of ensuring food security (FS) of states under the influence of external factors — emergency situations (ES) is considered. The analysis of the impact on FS of negative events caused by: natural phenomena, virus epidemics, armed conflicts, terrorism is carried out. A scenario approach to ensuring FS in ES conditions is proposed as a task of decision-making under conditions of deep uncertainty, which is characterized by the lack of both sufficient probabilistic data on the possibility of the occurrence of events and the scale of the consequences.

Согласно данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, число людей, которые живут в условиях катастрофической нехватки продуктов питания Земли увеличилось с 705 тысяч в 2023 г. до 1,9 миллиона в 2024 г. [1]. Среди основных причин специалисты называют: конфликты в Газе и Судане, а также засуха, вызванная климатическим явлением Эль-Ниньо и тенденции общего роста цен на продовольствие [2]. Согласно Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20, продовольственная безопасность — это состояние социально-экономического развития страны, при котором обеспечивается продовольственная независимость Российской Федерации, гарантируется физическая и экономическая доступность для каждого гражданина страны пищевой продукции, соответствующей обязательным требованиям, в объемах не меньше рациональных норм потребления пищевой продукции, необходимой для активного и здорового образа жизни. Зарубежные авторы (Джесси Дж., Эми Р. Мур, Кортни Хенриксен) предлагают следующее трактование: состояние страны, когда население обеспечивается доступным и качественным продовольствием со стабильными периодами доставок [3, 4]. Следует также обратить внимание на Цель № 2 — «Ликвидация голода, обеспечение продовольственной безопасности и улучшение питания, и содействие устойчивому развитию сельского

хозяйства», которая находится в перечне из 17 глобальных целей устойчивого развития в мире на период до 2030 г., утвержденных Генеральной ассамблеи ООН, что подтверждает актуальность проблемы исследования [5].

Решение задачи обеспечения ПБ государств осложняется возможностью значительного влияния внешних факторов, среди которых определяются ЧС природного и техногенного характера. Согласно одной из общепринятых классификаций, ЧС категорируют по источникам угроз: а) биолого-социальные; б) военные и терроризм; в) природные и экологические; г) техногенные; при этом также широко применяется категорирование по двум видам — природные и техногенные [6].

Чрезвычайные ситуации последнего десятилетия оказали серьезное влияние на ПБ: сбои цепочки поставок продуктов питания из-за пандемии COVID-19 и глобальный энергетический кризис 2021–2022 гг., серьезные наводнения в 2021 г. (Китай, Европа, Австралия) [7]. Специальная военная операция (СВО) с 2022 г. и санкционные ограничения также затронули множество государств по всему миру, для которых Россия и Украина являлись приоритетными поставщиками сырья (ранее был зафиксирован наибольший рост цен на растительные масла (на 23,2% в марте к февралю 2022 г.) и крупы (на 17,1%, соответственно), а также на мясо, сахар и молочные продукты [8].

Обеспечение продовольственной безопасности в условиях внешних угроз, в том числе возрастающих ЧС природного и техногенного характера является первостепенной задачей любого государства, при этом особую сложность решению задачи придает возможность возникновения ЧС непредвиденно, с высокой скоростью и неожиданными по своим масштабам последствиями, что характерно для событий, относящихся к глубокой неопределенности. В классическом понимании обеспечение продовольственной безопасности государства построено исходя из формы государственного устройства, политического режима, международных отношений и может быть сильно ограничено внешними факторами. Возникновение событий в условиях глубокой неопределенности происходит вне статистических данных, что не позволяет применять вероятностные модели, в связи с чем используются модели и методы принятия решений, основанные на сценарном моделировании. Сценарное моделирование позволяет разрабатывать множество сценариев развития событий и производить оценку возможности их возникновения. Среди таких инструментов выделяют динамическое адаптивное планирование и робастное принятие решений, сетевой анализ (в [9] показано применение сетевого анализа для решения задачи обеспечения ПБ) и др. [10]. В настоящем исследовании предложен вариант применения авторской концепции сценарного планирования обеспечения ПБ в условиях ЧС с использованием основ теории Динамического адаптивного планирования (ДАП).

Обсуждение полученных результатов и выводы. Для решения стратегических задач государственного управления успешно применяется ДАП, что нашло применение в зарубежных странах: для управление рисками при наводнениях в Нидерландах в связи с изменением климата, при планировании внедрения инновационного городского транспорта, при оценке загруженности дорог [10]. В последние годы расширяется научный потенциал применения ДАП в Российской Федерации: для обеспечения безопасности полетов при влиянии внешних угроз, а также как инструмента снижения негативных последствий чрезвычайных ситуаций природного характера при принятии управлении решений [11].

Авторская концепция сценарного подхода с основами ДАП предполагает следующий взгляд на проблему обеспечения ПБ в условиях ЧС (рис. 1).

Предложенная концепция предусматривает возможность применения отдельных инструментов математического моделирования для решения вероятностных задач и огра-

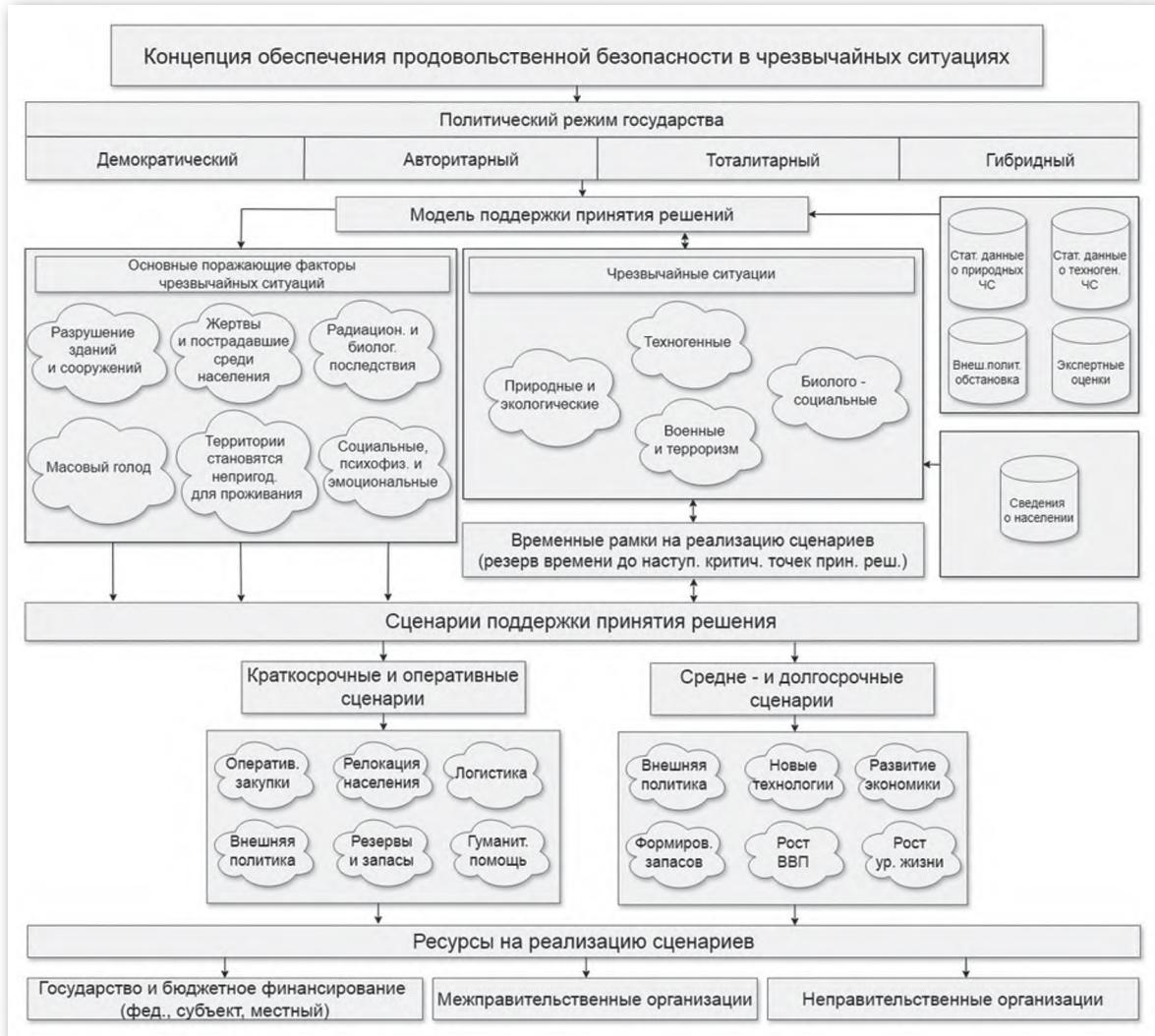


Рис. 1. Сценарная концепция обеспечения ПБ в условиях ЧС

ничивается исключительно возможностями сбора и обработки данных, финансовым обеспечением на реализацию и поддержание готовности сценариев действий, при этом связь возможности их реализации находится в объективной зависимости от величины валового внутреннего продукта (ВВП) государства.

Изменение климата и повышение числа природных опасностей, рост научно-технического прогресса и связанных с этим вызовов в сфере техногенных угроз — проблемы, которые требуют применения новых научных подходов, основное направление которых основано на разработке множества возможных сценариев и заблаговременном планировании действий даже на случаи максимально неожиданных ситуаций. Настоящая работа посвящена развитию сценарного моделирования и призвана развить научный задел для дальнейших исследований, направленных на снижение негативных последствий ЧС и их влияния на социально-экономические показатели государства и качество жизни населения.

Данная работа осуществлена в рамках Программы научного проекта «Модели и методы принятия решений в условиях глубокой неопределенности» НИУ ВШЭ в 2025 году.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад ООН: за год число голодающих увеличилось в два раза. Новости ООН. Глобальный взгляд. Человеческие судьбы. <https://news.un.org/ru/story/2024/09/1455971>, электронный ресурс, дата обращения: 12.04.2025.
2. В 2025 году ФАО потребуется 1,9 млрд долл. для оказания жизненно необходимой чрезвычайной сельскохозяйственной помощи 49 млн человек. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединённых Наций. <https://www.fao.org/newsroom/detail/for-2025—fao-seeks-1.9-billion-to-provide-life-saving-emergency-agriculture-assistance-to-49-million-people/ru>, электронный ресурс, дата обращения: 12.04.2025.
3. Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации».
4. Ковзунова Е. С. Подходы к трактовке понятия «Продовольственная безопасность»: анализ отечественного и зарубежного опыта // Менеджмент социальных и экономических систем. 2019. № 2. С. 22–28.
5. Цели устойчивого развития (ЦУР). ООН. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>, электронный ресурс, дата обращения: 12.04.2025.
6. Хачикян П. П. Прогнозирование и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного характера как актуальные задачи в условиях глубокой неопределенности // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2024. № 2. С. 54–71.
7. Food prices jump 20.7% yr/yr to hit record high in Feb, U.N. agency says. Reuters. 5 March 2022. https://www.reuters.com/world/food-prices-hit-record-high-february-un-agency-says-2022-03-04/?_x_tr_sl=ru&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=wapp, электронный ресурс, дата обращения: 03.02.2025.
8. Полунина Н. Ю., Попова Е. А., Зайцева Е. А. Взаимосвязи между военным конфликтом и продовольственной безопасностью. Экономическая теория // Экономические и социальные проблемы России. 2023. № 2 (54). С. 15–30.
9. Aleskerov F. T., Dutta S. D., Egorov D. S., Tkachev D. S. Networks under deep uncertainty concerning food security // Journal of the New Economic Association. 2024. 3 (64). P. 12–29.
10. Marchau Vincent A. W. J., Walker Warren E., 10. Bloemen Pieter J. T. M., Popper Steven W. (edit.). Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice. Springer, 2019, 405 p.
11. Хачикян П. П. Динамическое адаптивное планирование как инструмент принятия решений для снижения негативных последствий чрезвычайных ситуаций природного характера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2024. № 4. С. 9–27.

НЕБЕСНЫЕ ГОРЫ. ТЯНЬ-ШАНЬ. «ИССЫК-КУЛЬСКИЕ» РЕФЛЕКСИИ

C. V. Малаховская

CELESTIAL MOUNTAINS. TIEN SHAN. «ISSYK-KUL» REFLECTIONS

S. V. Malakhovskaya

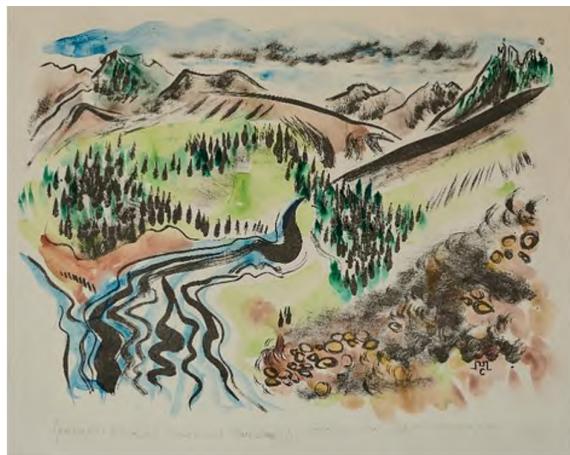
Серия литографий «Небесные горы. Тянь-Шань» посвящена геологической экскурсии вокруг озера Иссык-Куль, организованной Андреем Михайловичем Корженковым, доктором геолого-минералогических наук, заведующим лабораторией Института физики Земли РАН. Снежные пятитысячники, голубые горные реки, фантастические формы рельефа, красные и желтые скалы, древние петроглифы, мечеть-пагода, караван-сараи на Великом шёлковом пути, руины крепостей и монастырей, следы древних землетрясений — все эти впечатления послужили точкой отсчета для создания серии. Название отталкивается от горной гряды Тянь-Шань: «Небесные горы» — один из переводов с китайского. Пейзажи нарисованы традиционными кисточками для каллиграфии в динамичной импровизационной манере, чтобы максимально полно передать медитативный дух Азии. В то же время экспрессия линий, стремительно бегущих от дальнего плана к ближнему, близка поэтике вангоговских пейзажей. Земная кора — живая, ее движение непрерывно и мощно, человек не может противостоять разрушительной силе стихии, а может только наблюдать и — вот послание для зрителя. Предугадать ее «настроение» в будущем, тщательно проанализировав прошлое, — вот задача для ученого и повод поразмышлять для художника.

Выбор техники — литография — несет символический смысл корневой связи с материей, с земной корой, с горной породой. Горы нарисованы на «куске горы» и отпечатаны на итальянской бумаге Fabriano Rosaspina. Графические листы созданы в знаменитой петербургской мастерской Алексея Баранова. Тираж каждого сюжета всего 15 нумерованных экземпляров, и каждый оттиск является уникальным произведением искусства с авторской подписью и подкраской акварелью. Серия включает в себя восемь листов формата 50×70.

Это одно из самых красивых мест на Иссык-Куле. Здесь протекает река Чон-Аксу — «большая белая река» — по линии сейсмоактивного разлома, вдоль которого произошло землетрясение 1911 г. Оно было очень сильным, 10–11 баллов, и знаменитый сейсмолог Чарльз Рихтер назвал его «величайшей катастрофой земного шара в XX веке». В то же время образовавшийся рельеф невероятно живописен, и, глядя именно на этот вид на перевале Кок-Бель, руководители Кыргызстана и Российской Федерации в 1990-х гг. проводили неофициальные свои встречи.

Изображена дорога из города Балыкчи (бывш. Рыбачье) в город Каракол (бывш. Пржевальск). Вдоль трассы здесь сажали тополя, они задают этой местности неповторимый узнаваемый колорит. Сельскохозяйственные угодья спускаются до самого Иссык-Куля, а за ним мы видим наклонную предгорную равнину, на которую откладываются продукты разрушения хребта Кунгей Ала-Тоо. Продукты разрушения сносятся в виде шлейфов, перекрывающих друг друга. Мощный хребет часто перекрывается грозовыми тучами.

Предгорья (адыры) хребта Терской Ала-Тоо прорезаются рекой Каджи-Саз (Саз — болото, Кажди — ходжа). За изображенным адыром расположена плодородная долина, куда и ведет дорога. Северный склон адира — доорогенный пенеплен (древняя



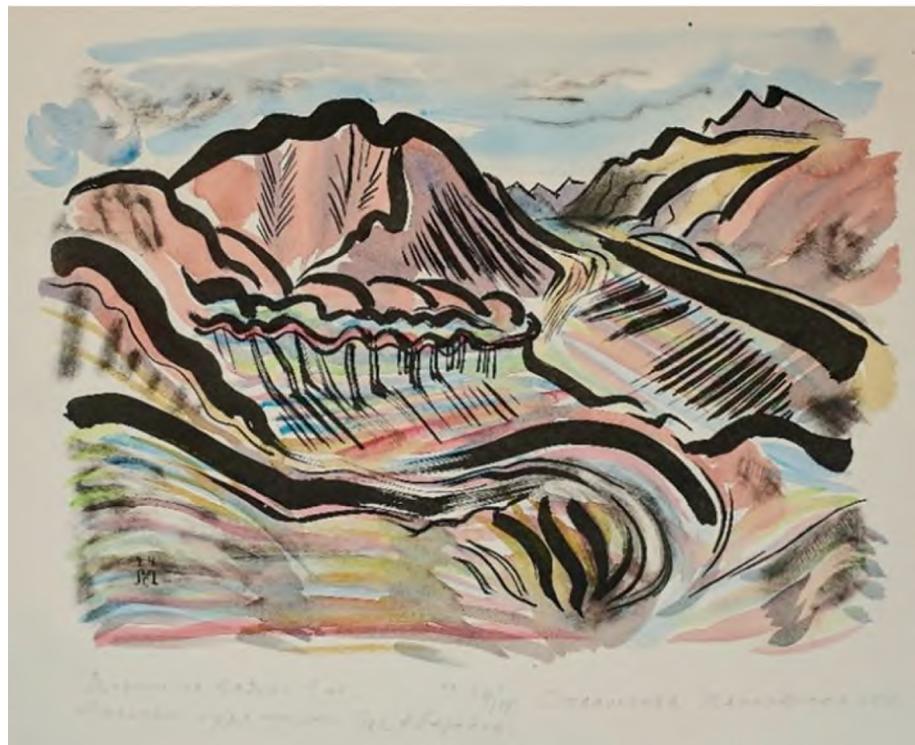
Григорьевское ущелье. Перевал Кок-Бель.
Тянь-Шань. 2025.

Литография, акварель. 50×70.
Станислава Малаховская



Семеновское ущелье. Одинокий жеребенок.
Иссык-Куль. 2024.

Литография, акварель. 50×70.
Станислава Малаховская

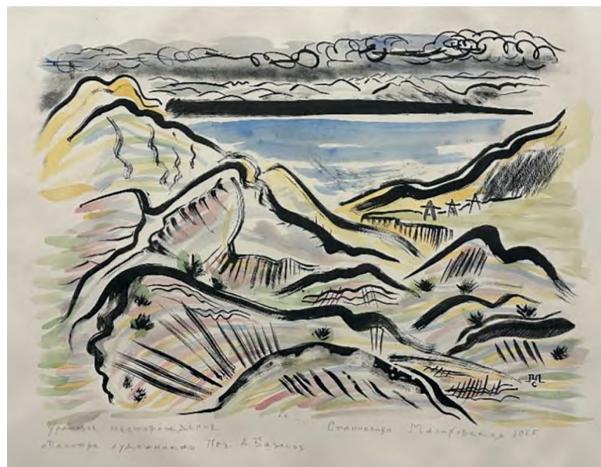


Дорога на Каджи-Сай. «Палитра художника». 2025.
Литография, акварель. 50×70. *Станислава Малаховская*

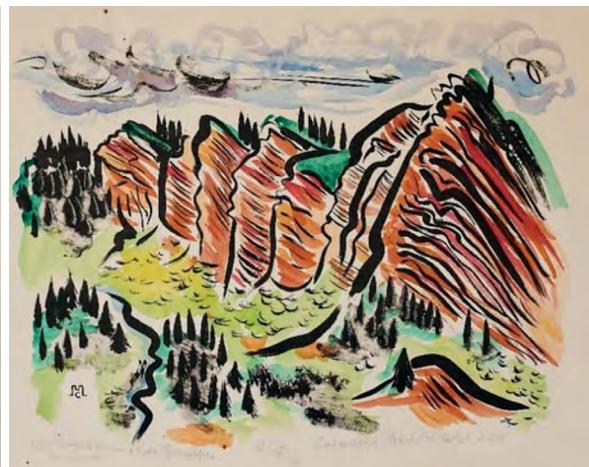
денудационная поверхность). Сто миллионов лет назад на территории Тянь-Шаня была ровная поверхность, а потом эти горы были на дне Иссык-Куля. Только «недавно» тектоническими движениями пенеплен был поднят на поверхность. Он хорошо сохранился, так как до недавнего времени был перекрыт осадками озера. Мы видим плоскую поверхность, которая конформно перекрывает радиоактивными юрскими отложениями. Горизонтально лежащая когда-то порода теперь приобрела такое наклонное положение. Белые юрские отложения с большим количеством фауны лежат на этом пенеплене.

Из-за адыров южного хребта Терской Ала-Тоо выглядывает озеро Иссык-Куль, а на дальнем берегу видны адыры северного хребта Кунгей Ала-Тоо. На переднем плане изображена свита «палитры художника», что на восточной окраине горного поселка Каджи-Сай. Это образное название разноцветных отложений юрского периода. В шахтах добывались юрский уголь и урановая смолка, очень богатая порода с ураганным содержанием урана: ее нужно совсем немного обогатить, чтобы перерабатывать в исходный продукт, необходимый для выработки электричества, или, скажем, в оружейный плутоний. Рассказывают, что первые советские атомные бомбы были созданы с использованием урановой смолки именно из этих шахт. Сейчас здесь ведутся лишь рекультивационные работы с «хвостами» — радиоактивными отходами от добычи урановой смолки. Искусственные площадки, которые были сделаны в адырах, нарушили естественное равновесие склонов. И если здесь произойдет сильное землетрясение — а оно потенциально произойдет, — эти площадки с «хвостами» обрушатся вниз в сухую долину между адырами, и во время дождя или таяния снега радиоактивные отходы попадут в воды Иссык-Куля.

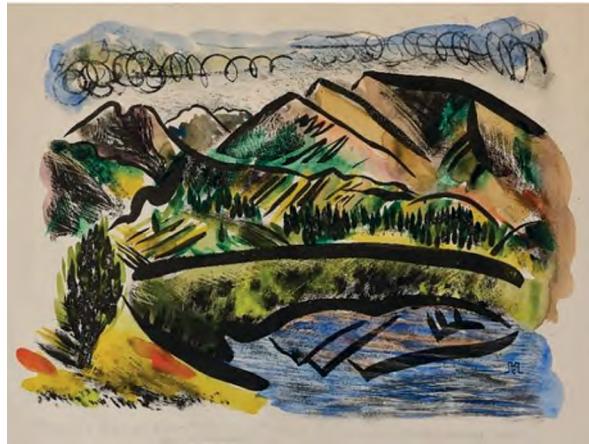
Изображены семь скал фантастической формы, которые носят сказочное название — Джеты Огуз или «Семь быков». Это очень древние отложения — им 20–25 млн лет. Киргизская свита обладает оттенком ярко-красного цвета. Даже на мелкосопочной равнине древнего пенеплена были свои поднятия и понижения, со временем поднятия разрушались, и рыхлый материал скапливался в понижениях, откладывались отложения этой свиты. Когда произошло столкновение Индии и Евразии, эти красноцветные отложения скопились в пра-Иссык-Кульской впадине. В настоящее время бывшие участки впадины поднимаются вверх из-за продолжающегося сжатия вследствие встречного движения литосферных плит. Олигоценовые и миоценовые отложения, изрезанные эрозией, имеют наклон 45 градусов. Прорезающая их река тоже называется Джеты-Огуз.



Урановое хвостохранилище Каджи-Сай — «Палитра художника». 2025.
Литография, акварель. 50×70.
Станислава Малаховская

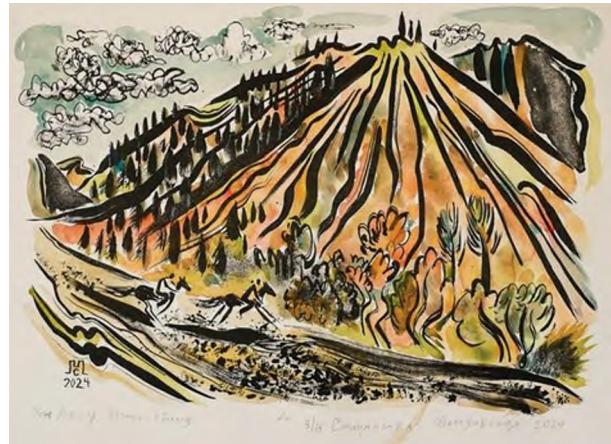


Джеты-Огуз (Семь быков). Тянь-Шань. 2024.
Литография, акварель. 50×70.
Станислава Малаховская



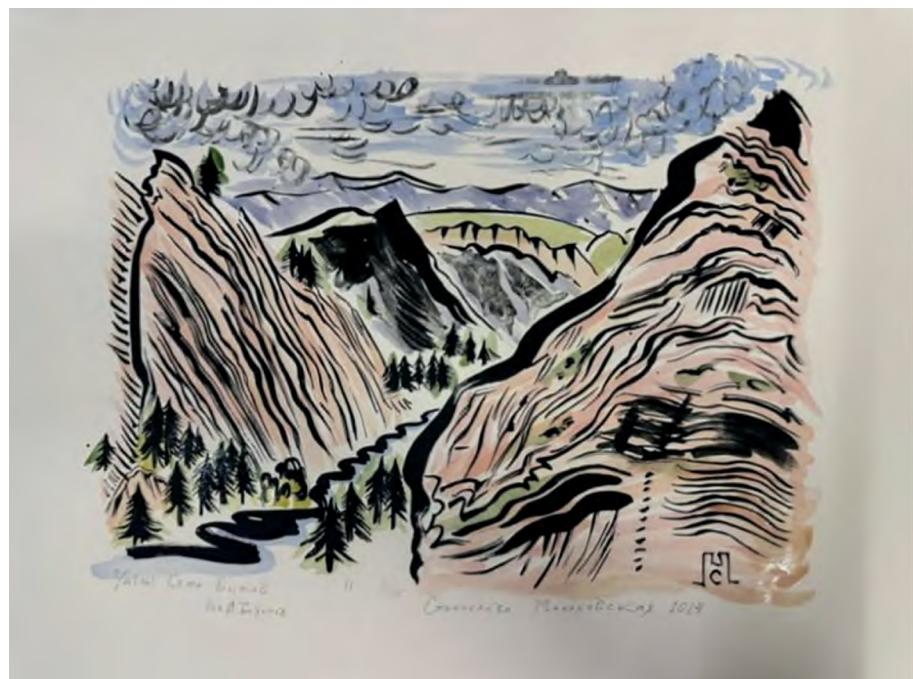
Полуостров Заячий — место православного катакомбного монастыря. Иссык-Куль. 2025.

Литография, акварель. 50×70.
Станислава Малаховская



Ущелье Чон-Аксу. Всадники. 2024.

Литография, акварель. 50×70.
Станислава Малаховская



Ущелье Джеты-Огуз. 2024.

Литография, акварель. 50×70.
Станислава Малаховская

Изображен северный берег озера Иссык-Куль. Современный уровень воды понизился относительно уровня XIX в. на 15 метров. Сегодняшний полуостров Заячий тогда был островом, на котором жили монахи. Для уединения они вырыли катакомбы, оставшиеся до сих пор. Средневековый храм армянских братьев, к сожалению, не сохранился. Русские монахи молились об обретении мощей Св. Матфея, Апостола и Евангелиста, которые по легенде находятся именно здесь. На гравюре показан хребет Кунгей Ала-Тоо, водораздельный отрог. Здесь же находится редкое явление для Иссык-Куля — большое месторождение известняка, из него производят цемент. По легенде в одном из известковых гротов находится клад с сокровищами Караканидской казны. Хранители казны, когда убегали от Тамерлана, спрятали их именно в этом водораздельном отроге. Поиски клада продолжаются до сих пор.

Этот антецедентный участок долины реки очень молодой, раньше она протекала в широтном направлении. Но хребет Кунгей Ала-Тоо с южной стороны «пилили» маленькие реки и пропилили так, что одна из этих маленьких речек перехватила воды верхней части Чон-Аксу. Крутизна скал говорит о том, что здесь очень интенсивные тектонические движения. Чуть севернее находится эпицентральная зона землетрясения 1911 г. Залесенный склон западной экспозиции, на нем произрастают тянь-шаньские ели. А по очень крутому восточному склону регулярно проходят осьпи, снежные лавины и селевые выплески.

Ущелье Джеты-Огуз (Семь быков) — точка притяжения для гостей Прииссыккулья. Здесь можно наблюдать сильный наклон отложений — 45 градусов (чем ближе к озеру, тем наклон меньше — 20, 10 и т. д.; горные породы — так же: чем ближе к озеру — все моложе и моложе). Необычный ландшафт с огненно-красными слоистыми скалами, расположенными под сильным наклоном, иссиня-зелеными елями привлекает не только фотографов, художников, путешественников и исследователей, но также и любителей мистики. По многочисленным преданиям это ущелье — место силы, и здесь можно ощутить связь с духами предков. Еще и поэтому люди стремятся посетить ущелье Джеты-Огуз снова и снова.

Станислава Малаховская — художник, искусствовед и музыкант. Основные сферы деятельности — игра на арфе (этно-ансамбль «Mama Nature Band») и графическое искусство. Работает в таких техниках как офорт, литография и рисунок тушью китайскими кистями. Создает станковые серии, экслибрисы и иллюстрации к детским книгам современных авторов. Окончила художественно-промышленную академию им. А.Л. Штиглица, член секции графики Союза художников России. Принимала участие в нескольких десятках выставок и художественных фестивалей. Ее работы находятся в Вологодской областной картинной галерее, а также в частных коллекциях в России и за рубежом.

Проводит исследования и публикует работы по истории русского книжного дизайна и иллюстрации, в частности, по творчеству ее прадедов Натана Альтмана (1889—1970) и Бронислава Малаховского (1902—1937), организатор выставок их работ.

СПИСОК АВТОРОВ

- Аксютин Олег Евгеньевич** — член-корреспондент РАН, ПАО «Газпром» (Санкт-Петербург)
- Алферова Хильда Владимировна** — Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский)
- Анараев Абдулхамидjon** — доктор исторических наук, Национальный центр археологии Академии наук Республики Узбекистан (Ташкент, Узбекистан)
- Анисимов Иван Михайлович** — кандидат технических наук, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва)
- Безотеческая Евгения Андреевна** — Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (Москва), Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (Санкт-Петербург)
- Бондур Валерий Григорьевич** — академик РАН, Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС» (Москва)
- Бусс Юлия Юрьевна** — Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский)
- Вольцингер Наум Евсеевич** — Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург)
- Воскресенский Кирилл Сергеевич** — Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (Санкт-Петербург)
- Выдрин Данил Сергеевич** — Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва)
- Гаврилов Валерий Александрович** — доктор физико-математических наук, Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский), Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга (Петропавловск-Камчатский)
- Гайдукова Екатерина Владимировна** — кандидат технических наук, Российский государственный гидрометеорологический университет (Санкт-Петербург)
- Гёк Эльчин** — PhD, Университет Девятого сентября (Измир, Турция)
- Гилева Екатерина Валерьевна** — Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (Нижний Новгород)
- Гусяков Вячеслав Константинович** — доктор физико-математических наук, Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (Новосибирск)
- Дворников Антон Юрьевич** — кандидат физико-математических наук, Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург)
- Дирксен Вероника Геннадьевна** — кандидат географических наук, Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский)
- Дирксен Олег Викторович** — кандидат географических наук, Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский)

Докукин Петр Александрович — кандидат технических наук, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы (Москва)

Долгих Григорий Иванович — академик РАН, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения РАН (Владивосток)

Долгих Станислав Григорьевич — член-корреспондент РАН, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения РАН (Владивосток)

Драбенко Дмитрий Вадимович — кандидат технических наук, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (Санкт-Петербург)

Дубей Адитья Кумар — PhD, Департамент наук о Земле и окружающей среде, Индийский институт естественнонаучного образования и исследований (Бхопал, Индия)

Епифанов Сергей Александрович — Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (Нижний Новгород)

Жарков Рафаэль Владимирович — кандидат географических наук, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН (Южно-Сахалинск)

Забаринская Людмила Павловна — Геофизический центр РАН (Москва)

Замшин Виктор Викторович — Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС» (Москва)

Замышляев Виталий Иванович — кандидат технических наук, Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург), Государственный гидрологический институт (Санкт-Петербург)

Зарубина Анастасия Игоревна — Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва)

Зеленкова Нина Геннадиевна — Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург)

Ивахнюк Сергей Григорьевич — кандидат технических наук, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Санкт-Петербург)

Кафтан Владимир Иванович — доктор технических наук, Геофизический центр РАН (Москва)

Кафтан Илкнур — PhD, Университет Девятого сентября (Измир, Турция)

Книппер Наталья Ивановна — Геофизический центр РАН (Москва)

Ковалев Иван Васильевич — доктор сельскохозяйственных наук, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва)

Ковалева Наталья Олеговна — доктор биологических наук, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва)

Козлов Дмитрий Николаевич — кандидат географических наук, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН (Южно-Сахалинск)

Корженков Андрей Михайлович — доктор геолого-минералогических наук, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (Москва)

Корженкова Любовь Андреевна — Институт геоэкологии имени Е. М. Сергеева РАН (Москва)

Крылова Тамара Александровна — Геофизический центр РАН (Москва)

Кумар Амит — PhD, Департамент наук о Земле и окружающей среде, Индийский институт естественнонаучного образования и исследований (Бхопал, Индия)

Кумар Панкадж — PhD, Департамент наук о Земле и окружающей среде, Индийский институт естественнонаучного образования и исследований (Бхопал, Индия)

Лал Прит — PhD, Департамент наук о Земле и окружающей среде, Индийский институт естественнонаучного образования и исследований (Бхопал, Индия), Департамент геоинформатики, Центральный университет Джаркханда (Ранчи, Индия)

Лейбман Марина Оскаровна — доктор геолого-минералогических наук, Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (Тюмень)

Липеровская Елена Викторовна — кандидат физико-математических наук, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (Москва)

Лобанов Андрей Александрович — доктор технических наук, Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург)

Лобанов Константин Эдуардович — Российский государственный гидрометеорологический университет (Санкт-Петербург)

Любушин Алексей Александрович — доктор физико-математических наук, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (Москва)

Майко Вадим Владиславович — доктор исторических наук, Институт археологии Крыма РАН (Симферополь)

Малова Татьяна Игоревна — кандидат географических наук, Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург)

Маневич Татьяна Михайловна — Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский)

Махинов Алексей Николаевич — доктор географических наук, Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения РАН (Хабаровск)

Махинова Александра Федоровна — кандидат географических наук, Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения РАН (Хабаровск)

Медведев Игорь Павлович — кандидат физико-математических наук, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва)

Медведева Алиса Юрьевна — Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва)

Морозова Юлия Валерьевна — Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский)

Муравьева Валерия Олеговна — Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва), Московский физико-технический институт (Долгопрудный)

Назарова Мария Анатольевна — Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский)

Нечаев Станислав Юрьевич — кандидат философских наук, Библиотека РАН (Санкт-Петербург), Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (Москва)

Носов Михаил Александрович — доктор физико-математических наук, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва), Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН (Южно-Сахалинск)

Орлова Елена Юрьевна — Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (Санкт-Петербург)

Пилик Дарья Игоревна — Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва)

Полтавцева Евгения Викторовна — Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский), Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга (Петропавловск-Камчатский)

Рабинович Александр Борисович — доктор физико-математических наук, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва), Институт океанологии (Сидни, Канада)

Римский-Корсаков Николай Андреевич — доктор технических наук, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва), Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Москва)

Родионов Анатолий Александрович — член-корреспондент РАН, Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург)

Родионов Евгений Анатольевич — кандидат физико-математических наук, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (Москва)

Родкин Михаил Владимирович — доктор физико-математических наук, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (Москва), Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (Москва)

Румянцев Владислав Александрович — академик РАН, Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург)

Рябченко Владимир Алексеевич — доктор физико-математических наук, Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург)

Савело Иван Евгеньевич — Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (Нижний Новгород)

Сагарьяров Илья Александрович — Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский), Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга (Петропавловск-Камчатский)

Санников Николай Александрович — Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева (Нижний Новгород)

Сергеева Наталья Александровна — кандидат физико-математических наук, Геофизический центр РАН (Москва)

Синькевич Андрей Александрович — доктор технических наук, Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Войкова (Санкт-Петербург)

Соболевская Ольга Викторовна — Камчатский филиал Единой геофизической службы РАН (Петропавловск-Камчатский)

Торопова Марина Леонидовна — Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Войкова (Санкт-Петербург)

Федористов Олег Викторович — Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский), Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга (Петропавловск-Камчатский)

Федотова Глафира Дмитриевна — Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (Санкт-Петербург)

Филатов Николай Николаевич — член-корреспондент РАН, Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург), Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (Петрозаводск)

Хантулева Татьяна Александровна — доктор физико-математических наук, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург), Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург)

Хачикян Павел Павлович — кандидат технических наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва), ООО «ГОСОБОРОНЗАКАЗ» (Москва)

Хомутов Артем Валерьевич — кандидат геолого-минералогических наук, Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (Тюмень)

Цуканова Елизавета Сергеевна — Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва)

Чверткова Ольга Игоревна — Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС» (Москва)

Шабанов Павел Александрович — кандидат географических наук, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва)

Шевчук Роман Васильевич — кандидат технических наук, Геофизический центр РАН (Москва)

Шугуан Лю — профессор, Университет Тунцзи, Департамент инженерной гидравлики (Шанхай, Китай)

Научное издание

**ПРИРОДНЫЕ ОПАСНОСТИ И КАТАСТРОФЫ:
ИСТОРИЯ, ПРОГНОЗ, ЗАЩИТА**

Коллективная монография

**Под редакцией
академика РАН Бондура В.Г.,
академика РАН Долгих Г.И.,
члена-корреспондента РАН Родионова А.А.**

Компьютерная верстка Е. А. Типцовой

Подписано в печать 12.12.2025. Формат 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 27,5. Тираж 500 экз. Заказ 1226.

Издательство СПбГЭУ. 191023, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, д. 30-32, лит. А.

Отпечатано на полиграфической базе СПбГЭУ