

СОДЕРЖАНИЕ

Том 94, номер 8, 2024

Лавёровские чтения 2024

Опасные природные явления и катастрофы: причины, последствия, возможности предотвращения	699
<i>В.М. Котляков</i> Академик Н.П. Лавёров: только вперёд!	702
<i>А.Д. Гвишиани, Н.А. Фоменко, Б.А. Дзобоев</i> Нечёткие множества и большие данные в трёхмерной интерпретации сейсмического районирования	704
<i>В.И. Данилов-Данильян, С.А. Подольский</i> Комплексный подход к решению проблемы наводнений в бассейне Амура	712
<i>А.Л. Собисевич, В.П. Дмитриченко</i> Сейсмоакустика шельфовых морей: фундаментальные основы совершенствования технологий мониторинга	727
<i>П.Н. Шебалин</i> Современные подходы к сокращению ущерба от землетрясений	738
<i>Е.А. Вознесенский</i> Распространение и прогноз развития опасных геологических процессов на территории России	749
<i>А.И. Зайцев, Г.И. Долгих, С.Г. Долгих, Е.Н. Пелиновский</i> Технические, аппаратные и программные решения для мониторинга природных процессов в южной части Охотского моря	760

Официальный отдел

Награды и премии	771
------------------	-----

CONTENTS

Vol. 94, no. 8, 2024

Laverov's Readings 2024

Dangerous natural phenomena and disasters: causes, consequences, possibilities of prevention	699
<i>V.M. Kotlyakov</i>	
Academician N.P. Laverov: only forward!	702
<i>A.D. Gvishiani, N.A. Fomenko, B.A. Dzeboev</i>	
Fuzzy sets and Big Data in three-dimensional interpretation of seismic zoning	704
<i>V.I. Danilov-Danilyan, S.A. Podolsky</i>	
An integrated approach to solving the floods problem in the Amur basin	712
<i>A.L. Sobisevich, V.P. Dmitrichenko</i>	
Seismoacoustics in arctic seas: fundamental principles for improving monitoring technologies	727
<i>P.N. Shebalin</i>	
Modern approaches to reducing damage from earthquakes	738
<i>E.A. Voznesensky</i>	
Geological hazards on the territory of Russia: their distribution and development prediction	749
<i>A.I. Zaytsev, G.I. Dolgikh, S.G. Dolgikh, E.N. Pelinovsky</i>	
Technical, hardware and software solutions for monitoring natural processes in the southern part of the sea of Okhotsk	760

Official Section

Awards and prizes	771
-------------------	-----

ОПАСНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ: ПРИЧИНЫ, ПОСЛЕДСТВИЯ, ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ



Академик Николай Павлович Лавёров (1913–2016)

“Лавёровские чтения” — это традиционное научное мероприятие, которое с 2017 г. Отделение наук о Земле РАН регулярно организует в память о выдающемся советском и российском учёном и крупном государственном деятеле — академике Николае Павловиче Лавёрове.

Николай Павлович Лавёров — академик АН СССР и РАН, вице-президент РАН, заместитель председателя Совета Министров СССР, председатель ГКНТ СССР. Он был выдающимся учёным, крупным организатором науки, видным государственным деятелем. Большинству из нас он известен как геолог, внёсший колоссальный вклад в развитие учения о рудных месторождениях. Особое значение имеют его исследования в области геологии месторождений урана: благодаря его исследованиям было сформулировано учение об исторической металлогении — науке, позволяющей прогнозировать районы, перспективные для обнаружения в них полезных ископаемых. Долгие годы Николай Павлович возглавлял научные исследования в системе Министерства геологии СССР и способствовал развитию прикладных разработок в геологической отрасли. Во многом благодаря его усилиям в нашей стране была создана уникальная минерально-сырьевая база.

Николай Павлович обладал энциклопедическими знаниями, что позволило ему успешно возглавить ГКНТ СССР и способствовать развитию

передовых технологий в нашей стране. Его научные интересы были очень широки: он занимался вопросами безопасности страны, чрезвычайными ситуациями, проблемами климата, рационального природопользования, безопасности использования атомной энергетики. Именно поэтому тематика проведённых ранее “Лавёровских чтений” была посвящена разным проблемам: происхождению и закономерностям размещения полезных ископаемых, созданию новых материалов, захоронению высокоактивных отходов, развитию минерально-сырьевой базы страны. Чтения приурочиваются к дню рождения Николая Павловича — 12 января.

В 2024 г. Всероссийская научная конференция прошла под названием “Опасные природные явления и катастрофы: причины, последствия, возможности предотвращения”. Напомним, что на протяжении многих лет Н.П. Лавёров возглавлял Научный совет РАН по проблемам экологии и чрезвычайным ситуациям, руководил крупнейшей междисциплинарной программой фундаментальных научных исследований Президиума РАН “Природные катастрофы и адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики”.

Чтения прошли под председательством академика-секретаря Отделения наук о Земле РАН академика РАН Н.С. Бортникова. В работе Конферен-

ции принял участие вице-президент РАН академик РАН С.М. Алдошин, а общее количество очных и дистанционных участников — более двухсот учёных и специалистов, представителей академической и отраслевой (Росгидромет, Роснедра) науки, подразделений Министерства чрезвычайных ситуаций РФ из Москвы и Санкт-Петербурга, ряда министерств и ведомств, а также аккредитованных СМИ.

В программе конференции был представлен широкий спектр докладов членов РАН, посвящённых проблемам возникновения и развития опасных природных явлений во всей совокупности взаимодействующих геосфер нашей планеты, в том числе связанных с наблюдаемыми изменениями климата. Представлены новые современные методы многодисциплинарного мониторинга среды обитания с целью заблаговременной выработки адаптационных сценариев и минимизации возможных последствий природно-техногенных катастроф различного масштаба и генезиса. По материалам докладов и подготовлен тематический выпуск журнала “Вестник Российской академии наук”.

Открывает выпуск научно-биографическая статья “Академик Н.П. Лавёров: только вперёд!” академика РАН В.М. Котлякова, в которой автор поделился воспоминаниями о совместной работе с Н.П. Лавёровым в разные годы.

Основополагающая статья академика РАН А.Д. Гвишиани, Н.А. Фоменко и Б.А. Дзедзоева “Нечёткие множества и большие данные в трёхмерной интерпретации сейсмического районирования” посвящена новым, нелинейным, подходам к сейсмическому районированию территории с использованием теории нечётких множеств и в зависимости от конкретного районизируемого параметра. Авторы рассматривают возможности применения теории нечётких множеств для обработки больших данных и предлагают новый подход к интерпретации результатов сейсмического районирования территории Российской Федерации и сопредельных стран.

Как известно, в настоящее время доля наводнений достигает более 40% от общего количества стихийных бедствий в мире, а наносимый ими ущерб сопоставим с сильнейшими землетрясениями. Член-корреспондент РАН В.И. Данилов-Данильян и С.А. Подольский в статье “Комплексный подход к решению проблемы наводнений в бассейне Амура” доказывают, что ориентация на защиту от наводнений только посредством гидростроительства не может обеспечить приемлемое решение комплекса геоэкологических проблем для исследуемого региона. Авторы высказывают обоснованное мнение, согласно которому альтернативные варианты экологически безопасны, равно как и экономически целесообразны.

В статье “Сейсмоакустика шельфовых морей: фундаментальные основы совершенствования тех-

нологий мониторинга” члена-корреспондента РАН А.Л. Собисевича и В.П. Дмитриченко представлены результаты создания научных основ технологии пассивного геогидроакустического мониторинга покрытых льдом акваторий Арктической зоны Российской Федерации, концепции дрейфующих ледовых антенн и рабочих макетов вмораживаемых измерительных буёв на основе векторных гидроакустических и молекулярно-электронных сейсмоприёмников нового поколения в интересах решения ряда прикладных задач.

Директор Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, член-корреспондент РАН П.Н. Шебалин в статье “Современные подходы к сокращению ущерба от землетрясений” глубоко и всесторонне исследует современные рискориентированные подходы к снижению ущерба от землетрясений, включая нерациональные затраты на антисейсмическое усиление конструкций, на основе карт общего сейсмического районирования, прогностических данных и систем раннего предупреждения. Проанализированы наиболее вероятные причины ошибок в картах общего сейсмического районирования территории России, намечены возможные пути их преодоления с учётом вероятностного и детерминистского подходов к оценке сейсмической опасности.

Одно из опасных природных явлений — оползни, то есть внезапные смещения огромных масс почв или горных пород, которые иногда вызывают гибель целых поселений. Объём горных оползней может достигать десятков миллионов кубометров, они перекрывают реки, создавая наводнения или образование новых водных объектов. Анализу распространения оползневых явлений, их морфологии и характеристикам, а также возможностям математического моделирования с целью их прогнозирования посвящена статья директора Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН Е.А. Вознесенского “Распространение и прогноз развития опасных геологических процессов на территории России”.

Наконец, ещё одному грозному проявлению стихии — цунами — посвящена статья члена-корреспондента РАН А.И. Зайцева, академика РАН Г.И. Долгих, С.Г. Долгих и Е.Н. Пелиновского. Проблема рассматривается с точки зрения современного уровня разработок технических, аппаратных и программных решений, выполненных в Специальном конструкторском бюро средств морских исследований ДВО РАН для систем мониторинга и оповещения.

Подводя итоги “Лавёровских чтений 2024”, следует отметить чрезвычайную актуальность тематики представленных работ в свете общемирового восходящего тренда повторяемости и масштабов опасных природных явлений и связанных с ними катастроф в последние десятилетия. Так, с 1980 по 2023 г. число катастрофических процессов на Земле увеличи-

лось в 3.5 раза, а ущерб от них вырос почти в 5 раз. По мере увлечения численности населения нашей планеты растёт и плотность заселения территорий, повышая тем самым уязвимость человека в отношении разномасштабных природно-техногенных катастроф, которые зачастую наносят существенный экономический ущерб и в целом негативно влияют на окружающую среду. Наряду с естественными причинами, немалый вклад в возникновение природных катастроф вносят урбанизация и интенсивное развитие промышленности, антропогенная нагрузка на окружающую среду, а также изменения климата.

Конференция убедительно показала острую потребность в разработке новых наукоёмких методов и технологий предупреждения природных бедствий, необходимость полномасштабного внедрения в практику систем многодисциплинарного мониторинга опасных природных явлений. Отмечено, что в интересах опережающего развития научных основ прогнозирования и предупреждения

чрезвычайных ситуаций, широкого использования данных многоуровневого дистанционного зондирования целесообразно сформировать специальную федеральную целевую программу.

Пользуясь случаем, благодарим докладчиков и участников конференции за их вклад в развитие научных направлений, становлению и развитию которых способствовал академик Николай Павлович Лавёров.

*Н.С. БОРТНИКОВ,
академик РАН, академик-секретарь
Отделения наук о Земле РАН*

*А.Л. СОБИСЕВИЧ,
член-корреспондент РАН,
заместитель академика-секретаря
Отделения наук о Земле РАН*

АКАДЕМИК Н.П. ЛАВЁРОВ: ТОЛЬКО ВПЕРЁД!

© 2024 г. В.М. Котляков^{a,*}

^aИнститут географии РАН, Москва, Россия

*E-mail: vladkot4@gmail.com

Поступила в редакцию 12.03.2024 г.

После доработки 12.03.2024 г.

Принята к публикации 18.07.2024 г.

DOI: 10.31857/S0869587324080018, EDN: FDJMPM

Кто сказал, что история не повторяется? Что времена и нравы безвозвратно уходят в прошлое, не оставляя ничего потомкам? Николай Павлович Лавёров являет собой яркий пример современного Ломоносова, достигшего известности и славы упорством, честностью и мягкой непримиримостью к своим оппонентам.

Древний Каргополь на рубеже Вологодской и Архангельской областей стоит здесь с незапамятных времён. В былые времена его украшали десятки церквей и храмов. А в просторных высоких северных избах жили и трудились северороссы – особая ветвь русского народа.

Много лет тому назад в своей статье, опубликованной в “Правде”, я отметил, что суровая природа, обширные малообжитые пространства, особый исторический путь европейского севера России сформировали своеобразные черты характера, так выпукло выраженные, вплоть до наших дней, в поморах, населяющих побережье Белого моря. Север европейской России вплоть до времён Ивана Грозного занимал особое положение, оставался независимым и, по существу, республиканским. И если бы республиканские и иные традиции не были жестоко подавлены в XVI–XVIII вв. Москвой, кто знает, может быть, вместе с русскими, украинцами и белорусами мы имели бы четвертую по счёту восточнославянскую нацию – северороссов.

Н.П. Лавёров – яркий представитель северороссийской ветви русского народа. Как и М.В. Ломоносов, он самостоятельно вошёл в жизнь своей большой страны, стал замечательным геологом, лучшим знатоком урановых месторождений и уже в молодые годы проявил исключительные способности в науке, организации производства и умении

общаться и работать с людьми самых разных социальных групп – от рабочих и рядовых геологов-исследователей до руководителей предприятий и министров.

Многие годы начального этапа своей деловой и творческой жизни Николай Павлович провёл непосредственно на урановых производствах и стал одним из основных деятелей, создававших в Советском Союзе мощную отрасль промышленности. Будучи совсем молодым, он уже “начальствовал” на урановых рудниках в Средней Азии, проявил себя лидером и недюжинным организатором и был замечен тогдашним Министром среднего машиностроения СССР Е.П. Славским.

С тех пор Н.П. Лавёров – в передовых частях советской геологии, у руля её руководства. Геология – это одна из немногих отраслей знания, объединяющая и важную отрасль производства, и фундаментальное направление науки. Поэтому вполне естественно и логично, что пришло время, когда Николая Павловича пригласили в руководство Академии наук, и он стал её вице-президентом, продолжив плеяду выдающихся имён – Д.И. Щербаков, А.П. Виноградов, А.В. Сидоренко, А.Л. Яншин.

Вице-президентству Лавёрова предшествовало его хождение во власть, когда он был назначен заместителем председателя Совета министров СССР и председателем Государственного комитета по науке и технике. В эти напряжённые годы своей жизни Николай Павлович продолжал отдавать много сил науке. Я помню, как существовавшая в те годы в Академии наук Программа биосферных и экологических исследований, которую возглавлял академик Г.И. Марчук, из-за нехватки средств не получила дальнейшего развития, и её место заняла програм-

ма ГКНТ “Глобальные изменения природной среды и климата”, разработанная под руководством Лавёрова.

В те годы (1989–1991) я был народным депутатом СССР, и в этом качестве мне пришлось тесно сотрудничать с Николаем Павловичем как заместителем председателя Правительства СССР. К этому времени относятся два эпизода нашего с ним сотрудничества.

В годы перестройки пересматривались многие порядки и принципы, устоявшиеся за десятилетия советской власти. Подверглась пересмотру и наша политика в Арктике, долгие годы совершенно закрытой для иностранных исследований. Начиная с конца 1970-х годов со стороны мировой научной общественности предпринимались безуспешные попытки втянуть СССР в арктические программы, и вот после речи М.С. Горбачёва, прозвучавшей в конце 1986 г. в Мурманске, впервые появилась такая возможность. Несколько стран обратились к СССР с предложением создать Международный арктический научный комитет, используя опыт существовавшего с конца 1950-х годов Международного комитета по исследованиям Антарктики.

В Государственном комитете по науке и технике в 1989 г. решили послать делегацию на эти переговоры, и Н.П. Лавёров назначил меня её руководителем. Переговоры и выработка статуса этого комитета продолжались почти два года и шли очень непросто. Всё это время я чувствовал, как Николай Павлович держит руку на пульсе этой проблемы. Впрочем, он всегда оказывал серьёзное внимание развитию научного сотрудничества и научных исследований в Арктике, которая приобретала всё большее значение для человечества, особенно в отношении природных ресурсов, которыми так богата северная полярная область.

Другое событие, которое помнится мне, относится к 1990 г. В апреле от имени президента США Дж. Буша делегацию АН СССР пригласили на

конференцию Белого дома по глобальным изменениям окружающей среды. Делегацию возглавлял Н.П. Лавёров, в её составе было несколько членов академии, и я в том числе. Два дня шли дебаты по злободневным вопросам, дважды на конференции выступал президент Дж. Буш. Он говорил о необходимости международного сотрудничества учёных по проблеме глобальных изменений окружающей среды, подчёркивал, что именно окружающая среда служит основой здоровой экономики. И только сильная экономика способна сохранить окружающую среду. Последняя мысль неоднозначна, но очевидна. Действительно, лишь сильная экономика способна создать новые высокие технологии, которые единственно и могут помочь нам сохранить природу наряду с прогрессом промышленности. Именно в этом направлении многие годы действовал Николай Павлович, добиваясь технического прогресса в геологии и во всей семье наук о Земле.

Нынешнее время ставит новые задачи перед наукой. И едва ли не самая главная – как осваивать новые и традиционные ресурсы на благо людей, но не в ущерб окружающей среде. Как сохранить поступательное движение экономики в условиях меняющегося климата, преодолевая косность взглядов и боязнь неограниченного “глобального потепления”. Лавёров был убеждён, что апокалиптические сценарии будущих изменений климата не имеют под собой научного обоснования, и он организовывал исследования в этой области науки так, чтобы показать ограниченность наших знаний и необходимость двигаться вперёд, углублять исследования климата и окружающей среды, прежде чем представлять безапелляционные заключения лицам, принимающим решения.

Наука всегда на марше. Она приносит полезные плоды и содействует принятию действенных решений, если ею руководят выдающиеся учёные, к которым я, безусловно, причисляю Николая Павловича Лавёрова.

ACADEMICIAN N.P. LAVEROV: ONLY FORWARD!

V.M. Kotlyakov^{a,*}

^a*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: vladkot4@gmail.com*

НЕЧЁТКИЕ МНОЖЕСТВА И БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ В ТРЁХМЕРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

© 2024 г. А.Д. Гвишиани^{a,b,*}, Н.А. Фоменко^{a,**}, Б.А. Дзебоев^{a,b,***}

^aГеофизический центр РАН, Москва, Россия

^bИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

*E-mail: a.gvishiani@gcras.ru

**E-mail: n.fomenko@gcras.ru

***E-mail: b.dzeboev@gcras.ru

Поступила в редакцию 08.05.2024 г.

После доработки 15.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

Опасные природные явления и катастрофы носят разрушительный характер, приводят к серьёзному материальному ущербу и большому количеству жертв, к тому же в большинстве случаев они возникают внезапно. Одно из таких опасных природных явлений — землетрясения. Авторы статьи рассматривают возможность применения нечётких множеств для обработки Больших данных с целью уменьшить разрушительные последствия землетрясений. Предлагается новый подход к интерпретации результатов сейсмического районирования территории Российской Федерации и сопредельных стран. Статья подготовлена по материалам научного доклада, представленного на Всероссийской научной конференции «Опасные природные явления и катастрофы: причины, последствия, возможности предотвращения (Лавёровские чтения 2024)».

Ключевые слова: нечёткие множества, Большие данные, 3D-модель, сейсмическая опасность, сейсмическое районирование.

DOI: 10.31857/S0869587324080026, EDN: FDIXBU

По данным МЧС России, в 2022 г. в Российской Федерации природные катастрофы составили 32.2% от общего числа чрезвычайных ситуаций. При этом пострадало 134 362 человека, а материальный ущерб составил 92.38% от общего ущерба, причинённого чрезвычайными ситуациями [1]. Отметим, что в 2022 г. в мире была зарегистрирована 421 природная катастрофа, экономический ущерб достиг сотен

миллиардов долларов. Здесь необходимо заметить, что за период 1990–2019 гг. произошли 9 924 природные катастрофы, из которых первое место, 41.5% от общего количества, занимают наводнения. На втором месте стоят ураганы (29.6%), на третьем — землетрясения (8.2%) (рис. 1) [2].

Среди разрушительных сейсмических событий наибольшие экономические потери принесло



ГВИШИАНИ Алексей Джерменович — академик РАН, научный руководитель Геофизического центра РАН. ФОМЕНКО Наталья Александровна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Геофизического центра РАН. ДЗЕБОЕВ Борис Аркадьевич — доктор физико-математических наук, заместитель директора по науке Геофизического центра РАН.



Рис. 1. Количество природных катастроф в мире за период 1990–2019 гг. [2]

землетрясение, произошедшее на северо-востоке Японии 11 марта 2011 г. с магнитудой 9.0 [3] и получившее название “Великое землетрясение Восточной Японии” [4]. Оно вызвало крупнейшее цунами, приведшее к развитию продолжительной аварии на крупной японской атомной электростанции (АЭС) “Фукусима-1”. Ущерб, нанесённый экономике, транспорту и инфраструктуре Японии, без учёта затрат, связанных с аварией на АЭС, составил около 210 млрд долл. Около 400 000 зданий были повреждены, из них 126 000 полностью или наполовину разрушены. По приблизительной оценке Министерства по охране окружающей среды Японии, из районов, пострадавших от цунами, было вывезено более 23 млн тонн мусора [5]. Составленный японскими экспертами план ликвидации последствий аварии на “Фукусима-1” рассчитан на 30 лет (до 2041 г.) [6].

На третьем месте по экономическим потерям среди всех природных катастроф, произошедших за 1990–2019 гг., находится землетрясение, произошедшее 17 января 1995 г. в Японии (г. Кобе) с магнитудой 7.3 [7]. Общий ущерб от него составил около 100 млрд долл. [8]. Были разрушены около 105 000 жилых зданий, 85% учебных заведений, повреждены более 144 000 различных сооружений, 274 100 домашних хозяйств, 7 200 дорог, 330 мостов и т.д.

Спустя 10 лет после землетрясения в городе Кобе состоялась Всемирная конференция по уменьшению опасности стихийных бедствий. По результатам конференции была принята Рамочная программа действий по снижению к 2030 году смертности в результате землетрясений, наводнений, ураганов и других стихийных бедствий; числа пострадавших людей в целом; сокращения размеров экономических потерь [9].

Наиболее разрушительные сейсмические события 2023 г. произошли 6 февраля на юго-востоке Турции вблизи границы с Сирией — два землетрясения

с магнитудами 7.8 и 7.7 [10, 11]. Пострадало более 18.1 млн человек, погибло более 50 000 человек, экономический ущерб составил не менее 100 млрд долл. [12]. Было разрушено около 180 000 зданий, под завалами которых находилась большая часть погибших и пострадавших. По оценкам экспертов, большинство зданий и сооружений были построены с нарушениями норм сейсмостойкого строительства [13].

В настоящей статье предпринимается попытка трактовки проблемы сейсмического районирования с точки зрения нечётких множеств и Больших данных (Бод).

СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ РОССИИ

Сейсмическое районирование, наряду с сейсмостойким строительством и укреплением зданий, — важный инструмент уменьшения ущерба от землетрясений. По своей сути выполнение сейсмического районирования является проектом системного анализа геолого-геофизических и сейсмологических данных. В нашей стране действует свод норм и правил, регулирующих строительство в сейсмоактивных районах в зависимости от макросейсмической балльности. В частности, этот свод регламентирует проектирование зданий и сооружений на территориях с сейсмичностью 7, 8 и 9 баллов [14]. Нормативной базой, наглядно демонстрирующей уровень сейсмической опасности территории Российской Федерации, служат карты Общего сейсмического районирования (ОСР).

Комплект современных нормативных карт ОСР-97 территории Российской Федерации [15, 16], предназначенный для строительства объектов разных категорий ответственности и сроков службы, был создан спустя 9 лет после Спитакского землетрясения, произошедшего 7 декабря 1988 г. [17] и ставшего одним из самых разрушительных в СССР. Следует отметить вклад в развитие исследований по Общему сейсмическому районированию нашей страны вице-президента АН СССР и РАН, академика Н.П. Лавёрова. В 1988–1989 гг., возглавляя научную группу Правительственной комиссии СССР по устранению последствий Спитакского землетрясения, он выступал одним из инициаторов методики ОСР.

По инициативе академика АН СССР М.А. Садовского, а затем и Н.П. Лавёрова в нашей стране была создана система сейсмических наблюдений, эффективно взаимодействующая сегодня с МЧС России и Минстроем России. Для мониторинга землетрясений в России и сопредельных странах в 1994 г. была создана Единая геофизическая служба РАН. В связи с успехом этого фундаментального проекта следует упомянуть имена членов АН СССР и РАН М.А. Садовского, Н.П. Лавёрова, В.Н. Страхова,

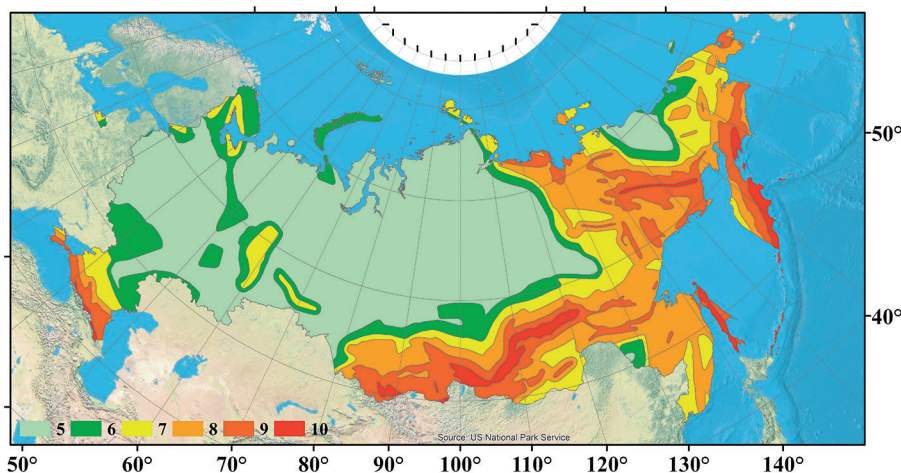


Рис. 2. Пример карты сейсмического районирования из комплекта нормативных карт ОСР-2016 [19]

А.Э. Конторовича, В.В. Адушкина, А.О. Глико, А.В. Николаева, Г.А. Соболева, А.А. Маловичко, а также профессоров И.Л. Нерсесова, В.И. Мячкина, Н.В. Шебалина, Е.А. Попова, Б.В. Кострова, Н.В. Кондорской [18].

Последними созданными и принятыми в качестве нормативных картами ОСР стал комплект ОСР-2016 [19] (рис. 2). При этом ОСР-2016, как и его предшественники, обладает рядом недостатков [20, 21]. Заметим, что на картах ОСР (например, рис. 2) в баллах шкалы интенсивности показано максимально возможное сейсмическое воздействие в точке (x, y) от любого землетрясения с любой магнитудой M , любым гипоцентром (X, Y, H) в любой момент времени t . Таким образом, интенсивность I есть конечнозначная функция, которую можно записать:

$$I(x, y) = I(x, y, M, X, Y, H, t, \xi), \quad (1)$$

где ξ – некая совокупность дополнительных аргументов, включающая в себя множество переменных, выходящих за рамки сейсмологических исследований. Примером элемента ξ здесь могут служить характеристики качества строительства. Отметим, что изучение поведения зависимости (1) как функции от ξ при сейсмическом районировании сегодня практически не проводится.

При построении карт ОСР используется шкала интенсивности Медведова–Шпонхойера–Карника MSK-64 (1964) [22], являющаяся 12-балльной, то есть $I = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$. Примеры других 12-балльных шкал интенсивности [23] – шкала Меркалли (1902) [24] и Европейская макросейсмическая шкала (EMS, 1998) [25].

Шкала MSK-64 преимущественно используется в Восточной Европе и в странах бывшего СССР. Она описывает в баллах наблюденную интенсивность в точке (x, y) по характеру воздействий на человека,

разрушений и изменений в окружающей среде. Общие характеристики зон балльности MSK-64 приведены на рисунке 3.

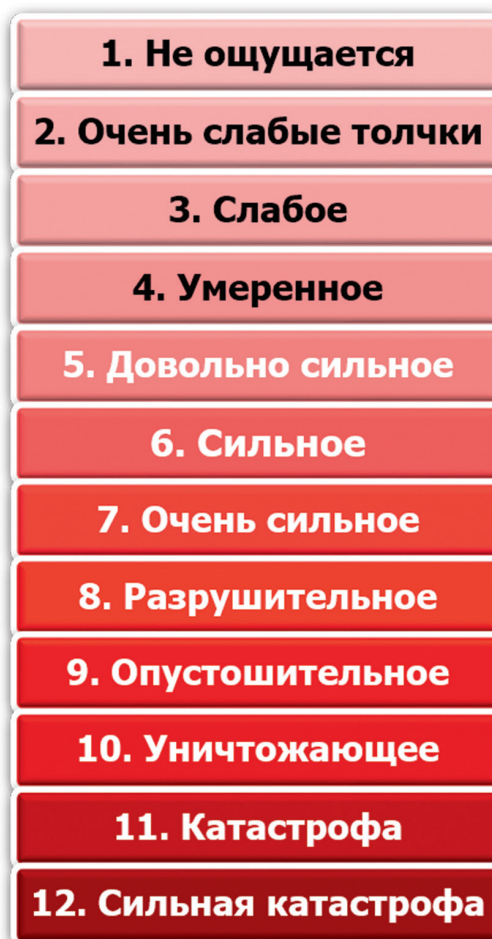


Рис. 3. 12-балльная шкала Медведова–Шпонхойера–Карника (MSK-64). Общая характеристика зон балльности

НЕЧЁТКОЕ МНОЖЕСТВО *i*-БАЛЛЬНЫХ СОТЯСЕНИЙ

В настоящее время при построении карт ОСР сейсмологи используют классическую теорию множеств. Попробуем посмотреть на задачу сейсмического районирования с другой точки зрения. Для иллюстрации нового возможного подхода введём несколько основных понятий:

- $X = \{x\}$ – классическое множество, состоящее из элементов $x \in X$;
- A – собственное подмножество X , иными словами, $A \subset X$, в то же время $A \neq X$;
- $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ – функция принадлежности, определяющая, в какой мере элемент $x \in X$ принадлежит подмножеству A . Функция $\mu_A(x)$, как правило, нелинейна и вводится алгоритмически;
- $F_x(A) = \{A, \mu_A(x)\}$ – нечёткое множество [26, 27].

Сегодня карты ОСР строятся по сейсмологическим оценкам $\max I(x, y)$. Соответственно, определённая территория на картах окрашивается в цвет максимальной интенсивности (рис. 2). Таким образом, выделяются, как правило, вложенные друг в друга зоны $S_i \supset S_{i+1}, i = 1, \dots, 11$ возможной максимальной интенсивности i , удовлетворяющие соотношениям:

$$S_i = \{ \forall (x, y) \in S_i : \max I(x, y) \geq i \}, \quad (2)$$

$$S_{12} \subset S_{11} \subset S_{10} \subset \dots \subset S_3 \subset S_2 \subset S_1.$$

Зоны $S_{i-1} \setminus S_i$ маркируются на карте ОСР единым цветом. Это говорит о том, что все точки, принадлежащие одной зоне, равноценны. В реальности это не так.

После создания плоской 2D-карты ОСР (подложка) необходимо сделать следующий фундаментальный шаг, продиктованный сутью решаемой задачи сейсмического районирования. Каждую точку $(x, y) \in X$ необходимо снабдить весом, ранжирующим возможность возникновения в ней

i-балльного сотрясения и определяющим отличие друг от друга точек из одной и той же зоны балльности подложки (рис. 2). Говоря на языке теории нечётких множеств, требуется построить функцию принадлежности $\mu_{S_i}(x, y)$ к S_i , например $i = 7$. Таким образом, возникает новая 3D-нечёткая интерпретация зон балльности на картах сейсмического районирования. Это есть набор нечётких множеств $F_x(S_i) = \{S_i, \mu_{S_i}\}$ (рис. 4).

БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ В РАЗВИТИИ ОСР

Построенные 3D множества $F_x(S_i)$ есть фрагменты 3D-ОСР-карты с 2D подложкой X . Их моделирование сводится к построению функций принадлежности μ_{S_i} . Построить модель μ_{S_i} помогут Большие данные, насыщаемые разнообразной информацией, которая относится к определению максимальных сотрясений. Объёмы и разнообразие видов Бод должны напоминать снежный ком, постоянно растущий за счёт включения в него новых компонентов [28].

Бод – это разнообразные данные, которые поступают и обрабатываются с растущими скоростью, объёмом и разнообразием. Они характеризуются основным критерием 3V: Volume (объём), Velocity (скорость), Variety (разнообразие); и дополнительными критериями: Value (ценность), Appropriacy (уместность), Variability (вариативность, возможность стать разнообразными со временем) [29]. В задаче сейсмического районирования Бод призваны заменить и субъективные выборки, которые сейсмологи берут за основу [30].

За прошедшие с момента создания комплекта карт ОСР-2016 8 лет объём новой геофизической информации существенно увеличился [31], и эти сведения могут служить ядром Бод для моделирования 3D-карты сейсмического районирования. Сюда относятся:

- глобальная сейсмологическая информация (историческая и оперативная);

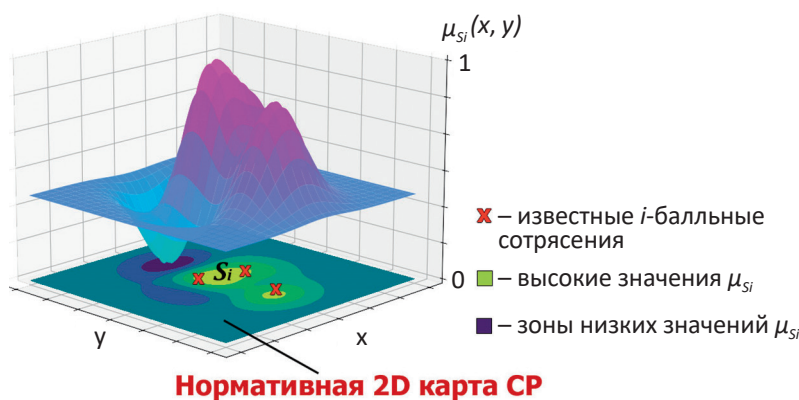


Рис. 4. *i*-балльная зона 3D сейсмического районирования – нечёткое множество $F_x(S_i) = \{S_i, \mu_{S_i}\}$

- результаты распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений и мониторинга проявления их активности;
- геологические, геодинамические, тектонические, геоморфологические данные;
- данные мониторинга вулканической активности;
- дистанционное зондирование Земли из космоса;
- возможно, многое другое.

С целью эффективного предотвращения разрушений зданий и сооружений при создании Бод и построении 3D-модели следует учитывать данные о застройке на рассматриваемой территории, включая:

- информацию о материалах, видах, классификации и планах развития строительства;
- данные об опасных производствах и объектах особой важности;
- информацию о строительстве новых и эксплуатации существующих транспортных магистралей и узлов, аэропортов, морских и речных портов;
- мониторинг строительства, в том числе данные о возведении новых зданий, сооружений и антисейсмическом укреплении объектов;
- данные мониторинга прокладки и планирования трубопроводов и электросетей;
- данные мониторинга состояния плотин и гидроэлектростанций;
- информацию о результатах проверок Ростехнадзора и т.п.

Многие другие виды информации могут оказаться важны для построения трёхмерного нечёткого сейсмического районирования. Какие именно — станет ясно в процессе создания Бод для их дальнейшего системного анализа.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Реализуемое сегодня сейсмическое районирование — это только часть необходимого исследования. Его искомым результатом, по своей сути, имеет трёхмерный характер. Третья пространственная компонента — значение весовой функции, численно определяющей возможность сильного сотрясения в данной точке. Эта часть ОСР на сегодня не разработана и не планируется к разработке.

Необходимо предложить теорию и практику, которые интегрировали бы исследования по Общему сейсмическому районированию и Большим данным. Важную роль в этом могут сыграть результаты распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений методами FCAZ (Formalized Clustering and Zoning) [32] и ERA (Earthquake-Prone Areas) [33, 34]. На сегодня это фундаментальное исследование, успешно реализуемое уже в течение

50 лет в ряде стран мира. Наша страна входит в число лидеров этого научного направления. Приведём список горных стран мира, где уже выполнено распознавание высокосейсмичных зон для сильнейших, сильных и значительных землетрясений.

- Метод FCAZ: Анды Южной Америки, Тихоокеанское побережье полуострова Камчатка, Калифорния, регион Прибайкалье—Забайкалье, регион Алтай—Саяны, восточный сектор Арктической зоны Российской Федерации, Кавказ и Крымский полуостров.

- Метод ERA: Памир и Тянь-Шань, Балканы, Калифорния и Невада, Апеннины и Сицилия, Анды, Камчатка, Западные Альпы, Пиренеи, Гималаи, Карпаты, Динариды, Эквадор, Иберийская плита, Северный Вьетнам, Центральный Французский массив, Кавказский регион, Северо-Западный Египет, Крым, Южная Сибирь и др.

Достоверность результатов распознавания сейсмоопасных зон методами FCAZ и ERA подтверждена контрольными экспериментами и локациями сильных землетрясений, произошедших после выполнения распознавания [34]. В то же время сегодня результаты этих исследований не используются при проведении ОСР, представляя собой параллельный поток знаний.

Оба указанных метода, FCAZ и ERA, созданы и развиваются в нашей стране. Сегодня необходимы исследования, которые обеспечивали бы адекватное включение результатов FCAZ и ERA в процесс сейсмического районирования.

Сейсмическим районированием и распознаванием сейсмоопасных зон занимаются разные специалисты. В первом случае это сейсмологи. Во втором — геоинформатики и математические геофизики [35]. Отметим, что внедрение в ОСР Больших данных поможет объединить усилия этих групп на основе системного анализа и инкорпорировать результаты FCAZ и ERA в виде блоков как сейсмического районирования, так и создания соответствующих Бод.

Общее сейсмическое районирование следует развивать, предусматривая переход от 2D к 3D-нечётким моделям его интерпретации. Методологической базой 3D сейсмического районирования должны стать: системный анализ, нечёткие множества, а также теория и практика Больших данных. Для построения описанной 3D-нечёткой модели ОСР необходимо создать долговременные совместные исследовательские группы сейсмологов, геоинформатиков, математиков, экономистов и геофизиков, а также специалистов в области искусственного интеллекта.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственных заданий Геофизического центра РАН (№ 075-00443-24-01)

и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (№ 075-00273-24-01), утверждённых Минобрнауки России.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовались данные и сервисы, предоставленные ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>).

ЛИТЕРАТУРА

1. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2023. Государственный доклад “О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2022 году”. <https://mchs.gov.ru/dokumenty/6751> (дата обращения 22.04.2024).

The Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 2023. State report “On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2022”. <https://mchs.gov.ru/dokumenty/6751> (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

2. РБК, 2023. \$383 млн в день: как человечество расплачивается за стихийные бедствия. <https://pro.rbc.ru/demo/64ede4ec9a794782cf04ada5> (дата обращения 22.04.2024).

RBC, 2023. \$383 million a day: how humanity is paying for natural disasters. <https://pro.rbc.ru/demo/64ede4ec9a794782cf04ada5> (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

3. *Simons M., Minson S., Sladen A. et al.* The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries // *Science*. 2011, v. 332, is. 6036, pp. 1421–1425. DOI: 10.1126/science.1206731.

4. РИА Новости, 2013. Землетрясение в Японии 11 марта 2011 года: хроника событий. <https://ria.ru/20130311/926334197.html> (дата обращения 22.04.2024).

RIA Novosti, 2013. Earthquake in Japan on March 11, 2011: chronicle of events. <https://ria.ru/20130311/926334197.html> (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

5. РБК, 2011. Япония раскрыла, сколько граждан погибло в мартовской катастрофе. https://www.rbc.ru/spb_sz/16/05/2011/559299809a794719538c130d (дата обращения 22.04.2024).

RBC, 2011. Japan revealed how many citizens died in the March disaster. https://www.rbc.ru/spb_sz/16/05/2011/559299809a794719538c130d (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

6. РИА Новости, 2012. Совещание по аварии на АЭС “Фукусима” открылось в Японии. <https://ria.ru/20120224/573514710.html> (дата обращения 22.04.2024).

RIA Novosti, 2012. Meeting on the accident at the Fukushima nuclear power plant opened in Japan. <https://ria.ru/20120224/573514710.html> (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

7. *Kanamori H.* The Kobe (Hyogo-ken Nanbu), Japan, Earthquake of January 16, 1995 // *Seismological Research Letters*. 1995, v. 66, is. 2, pp. 6–10. DOI: 10.1785/gssrl.66.2.6.

8. *Holzer Th. L.* The 1995 Hanshin-Awaji (Kobe), Japan, Earthquake // *GSA TODAY*. 1995, v. 5, no. 8, pp. 153–167.

9. РИА Новости, 2020. Разрушительное землетрясение в Кобе (Япония) 17 января 1995 года. <https://ria.ru/20200117/1563433390.html> (дата обращения 22.04.2024).

RIA Novosti, 2020. Destructive earthquake in Kobe (Japan) on January 17, 1995. <https://ria.ru/20200117/1563433390.html> (date of access: 04/22/2024). (In Russ.)

10. *Dal Zilio L., Ampuero J.P.* Earthquake doublet in Turkey and Syria // *Communications Earth & Environment*. 2023, v. 4, 71. DOI: 10.1038/s43247-023-00747-z.

11. *Михайлов В.О., Бабаянц И.П., Волкова М.С. и др.* Реконструкция косейсмических и постсейсмических процессов для землетрясения в Турции 06.02.2023 г. по данным радарной спутниковой интерферометрии // *Физика Земли*. 2023. № 6. С. 77–88. DOI: 10.31857/S000233372306011X.

Mikhailov V.O., Babayants I.P., Volkova M.S. et al. Reconstruction of Co-Seismic and Post-Seismic Processes for the February 6, 2023 Earthquake in Turkey from Data of Satellite SAR Interferometry // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2023, v. 59, is. 6, pp. 888–898. DOI: 10.1134/S1069351323060113.

12. РБК, 2024. Как выглядит Турция через год после землетрясения. Репортаж РБК. https://www.rbc.ru/society/06/02/2024/65c293349a79473a72e780dd?from=story_63e0ddb99a7947396e33c (дата обращения 22.04.2024).

RBC, 2024. What Türkiye looks like a year after the earthquake. RBC report. https://www.rbc.ru/society/06/02/2024/65c293349a79473a72e780dd?from=story_63e0ddb99a7947396e33c (access date 04/22/2024). (In Russ.)

13. РБК, 2023. В Турции нашли дефекты в конструкциях разрушенных при землетрясении домов. <https://www.rbc.ru/society/10/02/2023/63e6799c9a79473a86822510> (дата обращения 22.04.2024).

RBC, 2023. In Turkey, defects were found in the structures of houses destroyed by an earthquake. <https://www.rbc.ru/society/10/02/2023/63e6799c9a79473a86822510> (access date 04/22/2024). (In Russ.)

14. СП 14.13330.2018. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Москва: Росстандарт, 2018.
- SP 14.13330.2018. Set of rules. Construction in seismic areas. Updated edition of SNiP II-7-81*. Moscow: Rosstandart, 2018. (In Russ.)
15. *Ulomov V.I.* Seismic hazard of Northern Eurasia // *Annali di Geofisica*. 1999, v. 42, is. 6, pp. 1023–1038.
16. *Giardini D.* The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) – 1992/1999 // *Annali di Geofisica*. 1999, v. 42, is. 6, pp. 957–974. DOI: 10.4401/ag-3780.
17. *Cisternas A., Philip H., Bousquet J.C. et al.* The Spitak (Armenia) earthquake of 7 December 1988: field observations, seismology and tectonics // *Nature*. 1989, v. 339, pp. 675–679. DOI: 10.1038/339675a0.
18. *Лавёров Н.П., Леонов Ю.Г., Макоско А.А. и др.* Предложения по развитию и модернизации системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений // Проблемы национальной безопасности. Экспертные заключения. Аналитические материалы. Предложения / Под общ. ред. акад. Н.П. Лавёрова. М.: Наука, 2008. С. 206–232.
- Laverov N.P., Leonov Yu.G., Makosko A.A. et al.* Proposals for the development and modernization of the system of seismological observations and earthquake prediction // *Problems of national security. Expert opinions. Analytical materials. Proposals / General ed. acad. N.P. Laverov*. Moscow: Nauka, 2008. Pp. 206–232. (In Russ.)
19. Пояснительная записка к комплекту карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–122.
- Explanatory note to the set of maps of the General seismic zoning of the territory of the Russian Federation GSZ-2016 // *Engineering survey*. 2016, no. 7, pp. 49–122. (In Russ.)
20. *Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Скоркина А.А.* Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 91–97. DOI: 10.31857/S2686739722601466.
- Shebalin P.N., Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Skorkina A.A.* Why Are New Approaches to Seismic Hazard Assessment Required? // *Doklady Earth Sciences*. 2022, v. 507, part 1, pp. 930–935. DOI: 10.1134/S1028334X22700362.
21. *Шестоперов Г.С.* О недостатках карт общего сейсмического районирования России // ГеоИнфо. 2020. С. 1–8.
- Shestoperov G.S.* On the shortcomings of general seismic zoning maps of Russia // *GeoInfo*. 2020, pp. 1–8. (In Russ.)
22. *Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.* Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: Межведомственный геофизический комитет при Президиуме АН СССР, 1964.
- Medvedev S.V., Shponheuer V., Karnik V.* Seismic intensity scale MSK-64. Moscow: Interdepartmental Geophysical Committee under the Presidium of the USSR Academy of Sciences, 1964. (In Russ.)
23. *Шебалин Н.В., Антикаев Ф.Ф.* Развитие шкал типа MSK // Шкалы и методы в макросейсмике. 2003. С. 210–253.
- Shebalin N.V., Aptikaev F.F.* Development of MSK type scales // *Scales and methods in macroseismic*. 2003, pp. 210–253. (In Russ.)
24. *Wood H.O., Neumann F.* Modified Mercalli Intensity Scale of 1931 // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1931, v. 21, pp. 277–283.
25. *Grunthal G.* (Ed.) European Macroseismic Scale 1998 EMS-98. ESC, Subcommission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic Scale. Luxembourg, 1998.
26. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. V. 8. P. 338–353.
27. *Dubois J., Gvishiani A.* Dynamic Systems and Dynamic Classification Problems in Geophysical Applications. Paris: Springer-Verlag, 1998. DOI: 10.1007/978-3-642-49951-7.
28. *Гвишиани А.Д., Панченко В.Я., Никитина И.М.* Системный анализ больших данных для наук о Земле // Вестник РАН. 2023. Т. 93. № 6. С. 518–525.
- Gvishiani A.D., Panchenko V.Ya., Nikitina I.M.* System analysis of big data for Earth sciences // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2023, v. 93, no. 6, pp. 518–525. (In Russ.)
29. *Гвишиани А.Д., Добровольский М.Н., Дзеранов Б.В., Дзобоев Б.А.* Большие Данные в геофизике и других науках о Земле // Физика Земли. 2022. № 1. С. 3–34. DOI: 10.31857/S0002333722010033.
- Gvishiani A.D., Dobrovolsky M.N., Dzeranov B.V., Dzeboev B.A.* Big Data in Geophysics and Other Earth Sciences // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2022, v. 58, is. 1, pp. 1–29. DOI: 10.1134/S1069351322010037.
30. *Майер-Шенбергер В.М., Кукьер К.* Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живём, работаем и мыслим. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014.
- Mayer-Schoenberger V.M., Kukier K.* Big data. A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think. Moscow. Mann, Ivanov and Ferber, 2014. (In Russ.)
31. *Гвишиани А.Д., Дзеранов Б.В., Скоркина А.А., Дзобоев Б.А.* Мировые сейсмические сети и каталоги землетрясений // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24. № 1. ES1012. DOI: 10.2205/2024es000901.

- Gvishiani A.D., Dzeranov B.V., Skorkina A.A., Dzeboev B.A.* World Seismic Networks and Earthquake Catalogs // Russian Journal of Earth Sciences (RJES). 2024, v. 24, is. 1, ES1012. DOI: 10.2205/2024es000901.
32. *Dzeboev B.A., Gvishiani A.D., Agayan S.M. et al.* System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition // Applied Sciences. 2021, v. 11, 7972. DOI: 10.3390/app11177972.
33. *Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я. и др.* Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988.
Gvishiani A.D., Gorshkov A.I., Rantsman E.Ya. et al. Recognition of Earthquake-Prone Areas in the Regions of Moderate Seismicity. Moscow: Nauka, 1988. (In Russ.)
34. *Гвишиани А.Д., Соловьёв А.А., Дзебоев Б.А.* Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли. 2020. № 1. С. 5–29. DOI: 10.31857/S0002333720010044.
- Gvishiani A.D., Soloviev A.A., Dzeboev B.A.* Problem of Recognition of Strong-Earthquake-Prone Areas: a State-of-the-Art Review // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2020, v. 56, is. 1, pp. 1–23. DOI: 10.1134/S1069351320010048.
35. *Rozenberg I.N., Dulin S.K.* Current Issues Problems of Geoinformatics // Russian Journal of Earth Sciences. 2024, v. 24, is. 1. DOI: 10.2205/2024ES000893.

FUZZY SETS AND BIG DATA IN THREE-DIMENSIONAL INTERPRETATION OF SEISMIC ZONING

A.D. Gvishiani^{a,b,*}, N.A. Fomenko^{a,}, B.A. Dzeboev^{a,b,***}**

^a*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*E-mail: a.gvishiani@gcras.ru

**E-mail: n.fomenko@gcras.ru

***E-mail: b.dzeboev@gcras.ru

Natural hazards and disasters are destructive, lead to serious material damage and a large number of casualties, and in most cases occur suddenly. One of these hazardous natural disasters is earthquakes. The article is devoted to studying the possibility of using fuzzy sets for processing Big Data to reduce the destructive consequences of earthquakes. The article proposes a new possible approach to interpreting the results of seismic zoning of the territory of the Russian Federation and neighboring countries. The article is based on the materials of the scientific report made at the All-Russian Scientific Conference “Hazardous Natural Phenomena and Disasters: Causes, Consequences, Prevention Possibilities (Laverov Readings – 2024)”.

Keywords: fuzzy sets, Big Data, 3D model, seismic hazard, seismic zoning.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ НАВОДНЕНИЙ В БАССЕЙНЕ АМУРА

© 2024 г. В.И. Данилов-Данильян^{a,*}, С.А. Подольский^{a,**}

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, Россия

*E-mail: vidd38@yandex.ru

**E-mail: sergpod@mail.ru

Поступила в редакцию 06.05.2024 г.

После доработки 10.05.2024 г.

Принята к публикации 17.05.2024 г.

Разрушительные наводнения на территории России чаще всего случаются в бассейне Амура. Для защиты от этих стихийных бедствий планируется строительство гидростанций, так как их водохранилища способны перехватить часть паводка. Из возможных вариантов их размещения ПАО “РусГидро” выбрало створы в среднем течении р. Селемджи и в нижнем течении р. Зеи. В статье анализируются экологические последствия сооружения двух ГЭС, приводятся доводы о неприемлемости этих проектов. Авторы выдвигают обоснованное мнение, согласно которому альтернативные варианты экологически безопасны и при этом не более затратны. Ориентация на защиту от наводнений только посредством гидростроительства не может обеспечить приемлемое решение проблемы, поэтому необходимо комплексно использовать разнообразные подходы.

Ключевые слова: река Амур, защита от наводнений, водохранилище, Селемджинская ГЭС, Нижне-Зейская ГЭС, экологические последствия, экосистема, особо охраняемая природная территория, краснокнижный вид, альтернативный вариант.

DOI: 10.31857/S0869587324080037, EDN: FDINVU

Среди многих достижений, прославивших академика РАН Н.П. Лавёрова, есть одно, особенно значимое для экологов: изменение трассы нефтепровода “Восточная Сибирь – Тихий океан” [1]. Необходимость такого сооружения не вызывала

сомнений, вопрос был лишь в том, как проложить его трассу. С 2004 по начало 2006 г. обсуждались различные варианты, в том числе учитывающие требования экологической безопасности. Однако согласно проекту, официально представленному ПАО “Транснефть”, труба должна была пройти в 800 м к северу от Байкала, по южному (то есть спускающемуся к озеру) склону Байкальского хребта. О какой безопасности объекта Всемирного природного наследия – величайшего озера планеты – можно говорить, если сейсмическая, оползневая и селевая активность этой территории оценивается в 8–9 баллов? Доводы “Транснефти” в пользу “прибайкальского” варианта были экономическими: так короче, кроме того, трасса пройдёт вдоль железной дороги, что также удешевит строительство.

Научное сообщество, экологические активисты, деятели культуры, включая писателя В.Г. Распутина, выступили категорически против этого проекта и, естественно, встретили весьма агрессивное сопротивление его заказчиков и исполнителей. Каких только доводов в его пользу и опровержений экологических аргументов ни приводилось! Тем не менее все эти доводы оспаривались с научных по-



ДАНИЛОВ-ДАНИЛЬЯН Виктор Иванович – член-корреспондент РАН, научный руководитель ИВП РАН. ПОДОЛЬСКИЙ Сергей Анатольевич – кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора ИВП РАН.

зий (в противостояние вступили десятки членов РАН и все академические институты, занимавшиеся проблемами Байкала), а аргументы защитников озера признавались единственно правильными. Но неоспоримая научная логика не воспринималась “Транснефтью”, не производя никакого эффекта. Функционеры компании доказывали, будто “прибайкальский” вариант — безальтернативный. Лоббисты проекта не жалели сил и не стеснялись в средствах.

В начале весны 2006 г. шансы отстоять Байкал стали призрачными. Но 26 апреля в Томск прилетел Президент РФ В.В. Путин: здесь была намечена его встреча с канцлером ФРГ А. Меркель. Перед этой встречей Президент провёл совещание по проблемам социально-экономического развития Сибири очень высокого уровня (главы субъектов РФ, министры и др.), на котором присутствовал и вице-президент РАН академик Н.П. Лавёров. Николай Павлович спокойно и аргументированно объяснил, почему трассу нефтепровода необходимо сдвинуть на север от Байкала. Уже на следующий день на всех центральных телеканалах и во всех крупнейших СМИ появилась реакция В.В. Путина: “Трасса должна пройти севернее той зоны, которую обозначил Лавёров — не ближе, чем 40 километров от берега. Если есть хоть малейшая доля вероятности загрязнения Байкала, то мы должны сделать всё, чтобы эту опасность не минимизировать, а исключить” (цит. по [2], где подробно и объективно описана история сдвига трубы).

В мае 2006 г. появилось заявление ПАО “Транснефть”, что, в соответствии с указанием Президента РФ, трасса отодвинута к северу не на 40 км, а на целых 400 (такой вариант как наиболее целесообразный фигурировал среди предлагавшихся научным сообществом в 2005 г.). Первая очередь нефтепровода “Восточная Сибирь — Тихий океан” была сдана в декабре 2009 г., вторая — три года спустя. При строительстве были допущены различные ошибки и злоупотребления, отмеченные Счётной палатой РФ, тем не менее, похоже, что по итоговым затратам (включая такие факторы, как близость северной трассы трубопровода к новым нефтяным месторождениям, инфраструктурные преимущества и пр.) сдвиг на север оказался экономически более эффективным, чем “прибайкальский” сценарий. Нельзя не задаться вопросом: кому и почему этот последний был настолько выгоден, что его отстаивали всеми правдами и неправдами, рискуя своей репутацией?

История, однако, снова повторяется. Спустя 18 лет миру явлен ещё один проект — антиэкологичный, с весьма сомнительной экономической эффективностью, да к тому же явно не обеспечивающий достижение цели, ради которой он разрабатывался. Его мы и постараемся всесторонне рассмотреть в данной статье. Важно не только обозначить проблему, но и добиться результата под стать победе

Н.П. Лавёрова в вопросе пролегания трассы нефтепровода “Восточная Сибирь — Тихий океан”.

Наводнения. Глобальные климатические изменения проявляются не только в потеплении, но и в учащении и усилении гидрометеорологических стихийных бедствий: наводнений, засух, селей, экстраординарных волн жары или, наоборот, холода и пр. На долю наводнений в мире приходится более 40% всех стихийных бедствий, в России этот показатель ещё выше. В мире основной ущерб приходится на землетрясения, в России 40% всего ущерба причиняют наводнения. Крупнейшие эпизоды начала XXI в. — наводнения в Крымске (Краснодарский край) в 2012 г., на Амуре в 2013 г., в Тулуне (Иркутская область) в 2019 г.

При изменении климата наводнения происходят чаще и становятся сильнее, но как это влияет на проблему защиты и преодоления их последствий? Для противостояния стихийным бедствиям понадобится больше ресурсов (финансовых, материальных, технических), а также кадров, в том числе высококвалифицированных, но трудно ожидать появления принципиально новых методов борьбы и подходов. Конечно, будут совершенствоваться механизмы и технологии, системы мониторинга, разрабатываться новые модели прогнозирования, но всё это — повседневная необходимость, даже если бы никаких изменений климата не происходило. Успехи в борьбе с наводнениями определяются пристальным вниманием к этой проблеме, уровнем развития экономики и науки в стране.

На территории России наиболее частые наводнения происходят в бассейне Амура, и по ряду показателей они бьют все национальные рекорды (объём воды, высота её подъёма, длительность периода стояния на затопленной территории, площадь затопления и, как следствие, экономический ущерб). Муссонный климат с его внезапными мощнейшими ливнями и рельеф, способствующий заливанню местности, — главные природные факторы, обуславливающие тяжёлые последствия. Как защитить регион от сильнейших наводнений? Эта проблема требует системного подхода, её необходимо решать комплексно, опираясь на научные данные и максимально используя мировой опыт.

В августе 2021 г. Президент РФ по итогам совещания касательно ситуации с паводками и пожарами в субъектах России и ликвидации их последствий [3] поручил Правительству РФ совместно с правительствами Амурской области и Хабаровского края принять дополнительные меры по снижению риска наводнений и рассмотреть вопрос о строительстве объектов гидрогенерации в бассейне Амура, в том числе на реках Ниман и Селемджа, с учётом необходимости развития энергетической системы Дальневосточного федерального округа [4, п. 6].

С конца 2022 по начало 2023 г. в СМИ стала широко распространяться информация о том, что ком-

пания “РусГидро” уже собирается начать строительство Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС. Это вызвало озабоченность населения Амурской области и научного сообщества. Природные комплексы Дальнего Востока отличаются уникальным биоразнообразием и продуктивностью, но очень уязвимы. Это необходимо учитывать при выборе мест для строительства больших плотин и определении их технических параметров. Очевидно, что итоговые решения о возведении объектов подобного масштаба должны приниматься не на корпоративном, а на государственном уровне, с учётом мнения специалистов различного профиля и общественности. Однако есть серьёзные опасения, что рассматриваемые сейчас проекты окажутся узкоотраслевыми и уже поэтому малоэффективными и экологически неприемлемыми.

16 января 2024 г. в Общественной палате РФ по инициативе Комиссии Общественной палаты по экологии и устойчивому развитию прошёл круглый стол “Экологическая безопасность и строительство гидроэлектростанций в Амурской области”. В мероприятии приняли участие члены Общественной палаты РФ, представители различных федеральных органов исполнительной власти, ПАО “РусГидро”, АО “Ленгидропроект”, Ассоциации организаций и работников гидроэнергетики “Гидроэнергетика России”, Зейского государственного природного заповедника, Государственного природного заповедника “Норский”, межрегиональной общественной организации “Экспертный совет по заповедному делу”, общественности Зейского района Амурской области. Российская академия наук была представлена рядом ведущих специалистов в области экологии, гидрологии, заповедного дела, а также сотрудниками профильных академических институтов [5–9].

Первые два доклада были представлены авторами данной статьи. Затем эксперты высказали ряд критических замечаний по поводу проектов сооружения Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС и конструктивных предложений по борьбе с наводнениями в Приамурье. В нашей работе используются некоторые из озвученных идей, за которые мы выражаем искреннюю благодарность участникам обсуждения.

Основные экологические угрозы сооружения Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС. Проект Селемджинской ГЭС был отклонён Государственной экспертизой СССР ещё в 1988 г. как экологически опасный и убыточный (тогда ГЭС называлась Дагмарской, но её локализация предполагалась на том же створе, что и сегодня). Недопустимые экологические издержки, связанные с возможным созданием Нижне-Зейской ГЭС, выявлены в ходе комплексных натуральных исследований 2014–2016 гг. в рамках совместного проекта Программы развития ООН – Глобального экологического фонда [10–12].

Экологические последствия строительства водохранилищ весьма многообразны [13, 14], но определяются прежде всего тем, какие земли будут затопляться и подтапливаться. Сооружение и введение в эксплуатацию водохранилищ Селемджинской и Нижне-Зейской гидроэлектростанций приведёт к затоплению и подтоплению значительной части территории государственного природного заповедника “Норский” и двух особо охраняемых природных территорий (ООПТ) регионального значения (государственного природного заказника “Усть-Тыдинский” и водно-болотного угодья “Альдикон”) – мест обитания редких и находящихся под угрозой исчезновения объектов животного мира. Неизбежным следствием затопления станет сокращение численности и даже исчезновение некоторых локальных популяций диких животных [15, 16], что противоречит требованиям законодательства РФ¹. Риск такого ущерба уникальным природным комплексам Дальнего Востока недопустим и не может быть оправдан отраслевыми интересами гидроэнергетики.

В ходе круглого стола представители ПАО “РусГидро” признали, что планы строительства ГЭС предусматривают затопление 1.5% площади государственного природного заповедника “Норский” при нормальном подпорном уровне водохранилища, что составляет около 3 тыс. га. В связи с этим экспертами было отмечено, что такое затопление противоречит Федеральному закону “Об особо охраняемых природных территориях”, нарушает режим особой охраны заповедника, повлечёт за собой значительный ущерб и содержит признаки преступления, предусмотренные статьёй 262 УК РФ. Места обитания некоторых видов птиц (рис. 1), попадающие в зону затопления и подтопления Селемджинского водохранилища на территории Норского заповедника, имеют важнейшее региональное (сухонос, клоктун, дальневосточный аист), общероссийское (чёрный журавль) и мировое значение (рыбный филин, чёрный аист) [17]. В случае сооружения Селемджинской ГЭС их популяционные группировки будут элиминированы или окажутся на грани исчезновения.

Строительство Селемджинского и Нижне-Зейского водохранилищ разрушит эволюционно сложившиеся маршруты массовых сезонных миграций сибирской косули (рис. 2), что приведёт к фактической гибели крупной мигрирующей популяции этого вида, последней не только в стране, но и в мире. Неизбежность такого исхода обоснована исследованиями, проводившимися с 1980-х годов и продолжающимися по сей день [10, 16, 18, 19].

¹ Статьи 3, 40, 58 и 60 Федерального закона № 7-ФЗ “Об охране окружающей среды” от 10 января 2002 г., статьи 9 и 24 Федерального закона № 33-ФЗ “Об особо охраняемых природных территориях” от 14 марта 1995 г. и статьи 22 и 24 Федерального закона № 52-ФЗ “О животном мире” от 24 апреля 1995 г.



Рис. 1. Представители орнитофауны государственного природного заповедника “Норский”

a – клоктуны, вид занесён в Красные книги Амурской области и России (фото В. Колбина); *б* – дальневосточный аист, в Норском заповеднике обитает на крайней северной границе ареала (фото С. Подольского); *в* – чёрный журавль, занесён в Красные книги России, Амурской области и Международного союза охраны природы (МСОП), обитает в Норском заповеднике (фото С. Подольского); *г* – чёрные аисты, занесены в Красные книги России, Амурской области и МСОП, многочисленны на гнездовании в Норском заповеднике (фото С. Подольского)

Селемджинское водохранилище сделает недоступными места отёла и летние ареалы косуль, а Нижне-Зейское перекроет им пути к зимовкам в многоснежные годы. Масштабы единовременной гибели животных на переправах, по разным оценкам, составят от 8 до 12 тыс. особей. Косули будут на протяжении нескольких лет гибнуть на переправах, вплоть до исчезновения всей левобережной популяции бассейна средней Зеи. Это полностью противоречит целям создания федерального заказника “Орловский” и заповедника “Норский”, чья основная задача – охрана косуль. Будет в значительной степени утрачена их природоохранная функция. Сибирская косуля навсегда потеряет статус важнейшего массового вида в охотничьем хозяйстве севера Амурской области. Утрата этой популяции приведёт к негативным последствиям и для реализации программы восстановления амурского тигра: после массовой гибели кабана при эпизоотии косуля стала

главной кормовой базой тигра в Амурской области. Уничтожение последней крупной мигрирующей популяции сибирской косули в результате сооружения ГЭС и разрушения магистральных миграционных путей диких животных противоречит Федеральному закону “О животном мире” и содержит признаки преступления, предусмотренные статьёй 358 УК РФ “Экоцид”.

Заполнение водохранилищ неизбежно повлечёт за собой резкое снижение численности или элиминацию большинства рыб-реофилов². Исчезнут и самые северные группировки калуги зейско-буреинской популяции, занесённой в Красную книгу России (категория 1 – находящаяся под угрозой исчезновения популяция эндемичного для бассейна Амура вида).

² Реофилы – животные, приспособившиеся к обитанию в текущих водах.



Рис. 2. Массовая миграция косуль в зоне влияния Нижне-Зейского водохранилища выше посёлка Чагоян, ноябрь 2015 г.

Фото Д. Астафьева

По мнению экспертов, после сооружения ГЭС на несколько километров вдоль уреза воды водохранилищ произойдёт подтопление территорий в верхнем бьефе и обсыхание долин вниз от плотин по течению реки (на 500–800 км) в нижнем бьефе. Это приведёт к полному изменению и обеднению существующих аборигенных экосистем [15]: деградации заливных лугов, утрате ценных маревых, дубовых и черноберёзовых растительных сообществ,

снижению продуктивности охотничьих угодий и падению плодородия пойменных сельскохозяйственных земель.

Воздвижение двух новых больших плотин в среднем течении Селемджи и нижнем течении Зеи не сможет предотвратить экстремальные паводки, при этом грозит кардинальным нарушением естественного гидрологического режима и разрушением природных комплексов долины Амура за счёт срезки



Рис. 3. Японские журавли в Хинганском заповеднике

Фото С. Подольского

паводков средней повторяемости и снижения амплитуды колебания уровня грунтовых вод. Залог сохранности пойменных экосистем — периодическое заливание, сопряжённое с регулярными значительными колебаниями уровня грунтовых вод. Казалось бы, это неблагоприятные факторы, но обитающие здесь организмы не только приспособлены к ним, но, более того, совокупность этих и прочих факторов — необходимое условие устойчивости здешних экосистем. Когда привычный баланс нарушается гидростроительством, растительность быстро деградирует, а продуктивность сельскохозяйственных угодий резко снижается (аналог: разливы Нила определяют плодородие окрестных сельскохозяйственных угодий); старичные озёра (весьма многочисленные на левобережье среднего и нижнего Амура) без периодического промывания высокими паводками постепенно заиливаются и зарастают. После строительства Зейской и Бурейской ГЭС режим затопления поймы Амура уже претерпел существенные изменения. Одним из индикаторов стало снижение численности редких видов журавлей и аистов в Хинганском заповеднике (рис. 3). Дальнейшее сокращение частоты паводков приведёт к прогрессирующей деградации растительности, пойменных озёр и зоокомплексов с падением их продуктивности.

Поймы и долины крупных рек в бассейне Амура образовали систему экологических коридоров, по которым идёт межрегиональный обмен видами животных и растений. Важнейшие экологические коридоры регионального уровня связаны с долинами среднего и нижнего течения Зеи и Селемджи. Многообразие пойменных биотопов благоприятно для околководных животных, а главное — оно обеспечивает проникновение видов с южным типом распространения далеко к северу от основных ареалов. Именно с этим связан тот факт, что в зонах влияния проектируемых Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС зафиксировано не менее 30 видов животных, занесённых в Красные книги различного уровня (рис. 4). Появление новых гидроузлов приведёт к существенному снижению биоразнообразия всей северной части Амурской области.

Социальные и экономические издержки создания Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС. Главные негативные социально-экономические последствия сооружения этих гидроузлов становятся очевидными уже на этапе анализа экологических, гидрологических и географических аспектов: затопление значительных площадей продуктивных сельскохозяйственных и охотничьих угодий, ликвидация ряда посёлков, снижение транспортного потенциала реки Зеи, ощутимый ущерб рыбным ресурсам и др. Кроме того, можно с уверенностью предположить, что эти объекты окажутся весьма дорогостоящими и сами по себе, и по сравнению с альтернативными способами производства электроэнергии и борьбы с паводками. Конечно, этих доводов недостаточно, и все упомянутые аспекты, в том числе социально-

экономические, следует рассмотреть подробнее, а по некоторым вопросам требуются дополнительные исследования.



Рис. 4. Некоторые виды животных, занесённые в Красную книгу

а — солонгой, обычен в зоне влияния Нижне-Зейской ГЭС, вид занесён в Красную книгу Амурской области (фото А. Аверина); *б* — мандаринки, обычны на средней Зее и Селемдже, занесены в Красные книги России и Амурской области (фото М. Бабыкиной); *в* — сахалинская гадюка в зоне затопления Нижне-Зейского водохранилища, занесена в Красную книгу Амурской области (фото С. Подольского)

Основной причиной отклонения Государственной экспертизой СССР проекта Селемджинской (Дагмарской) ГЭС в 1988 г., наряду с экологической опасностью, стала его экономическая неэффективность. Подчёркивалось, что даже кадастровая стоимость земель, затопляемых равнинным водохранилищем, превысит прибыль от полученной электроэнергии, не говоря уже о колоссальной стоимости строительных работ. По мнению экспертов, из всех известных перспективных створов Дальнего Востока проект Селемджинской ГЭС наименее экономически эффективен, чреват не только экологическими, но и существенными финансовыми потерями.

При организации Селемджинского и Нижне-Зейского водохранилищ будут затоплены огромные площади пахотных земель и пастбищ. В нижнем бьефе плотин (нижнее течение Зеи и Селемджи) быстро утратят плодородие сотни тысяч гектаров наиболее продуктивных пойменных сельскохозяйственных угодий, выведенных из-под регулярного влияния паводков.

Создание водохранилищ приведёт к резкому снижению продуктивности охотничьих угодий. Косуля навсегда потеряет статус массового охотничьего вида, играющего важную роль в жизнеобеспечении местного населения. Падение численности коснётся и других промысловых видов наземных животных: кабана, изюбря, лося, рыси, колонка, куриных птиц. Богатейшие охотничьи угодья Зейского, Шимановского, Мазановского и Селемджинского районов фактически утратят своё промысловое значение. Многократно сократится поголовье таких ценных пород рыб, как хариус, ленок, таймень, сиг (рис. 5).

Ограничение биологических ресурсов негативно скажется на качестве жизни местного населения и, безусловно, не улучшит и без того крайне печальную демографическую динамику Амурской области (по данным Росстата [20], в 1989 г. численность населения области составляла 1 057 781 человек, с тех пор каждый год она сокращалась и в 2024 г., по прогнозу, опустится до 750 083 человек).

Крупномасштабное гидростроительство в среднем течении Зеи и Селемджи приведёт к попаданию в воду значительного объёма растительных остатков и другой органики. В первую очередь это касается равнинного Селемджинского водохранилища, затопляющего обширные торфяники Норских и Альдиконских марей. В результате разложения органики в искусственных водоёмах воды окажутся сильно загрязнены фенолами и другими токсичными соединениями (ПДК по фенолам будет превышена в десятки раз, как это отмечалось на Зейском и Бурейском водохранилищах).

Плотина Нижне-Зейской ГЭС перекроет крупнейшую водную артерию, по которой в город Зею доставляются крупнотоннажные грузы. Кроме того, выше устья Селемджи живописная долина Зеи, с чередованием прибрежных скал, таёжных сопок, заливных и суходольных лугов, представляет исключительные возможности для организации круизного туризма с использованием комфортабельного водного транспорта на маршруте Благовещенск—Зея. Ещё одной невосполнимой потерей для внутреннего туризма станет исчезновение последней в России и мире крупной мигрирующей популяции сибирской косули. Массовые ежегодные осенние переправы этих животных через реки Селемджа и Нора



Рис. 5. Ленок — один из основных видов ценных промысловых рыб Приамурья
Фото С. Подольского

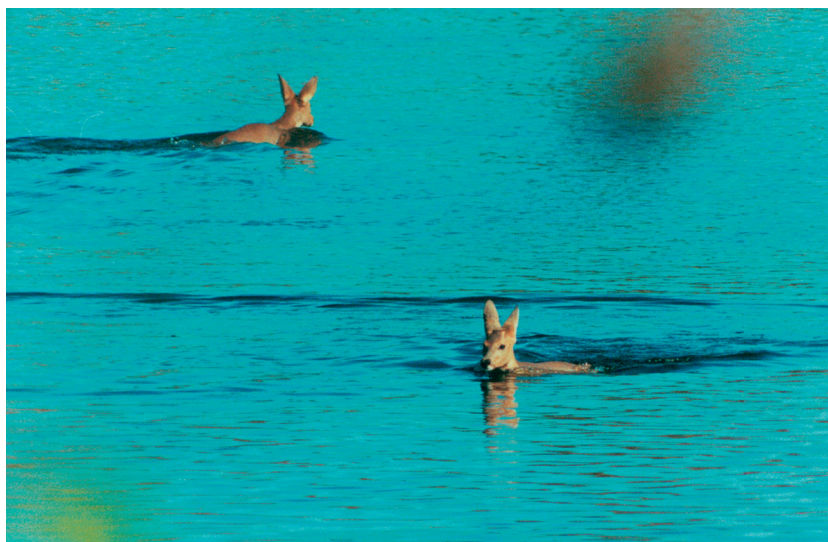


Рис. 6. Косулята на Норе во время осенней миграции
Фото С. Подольского

представляют уникальный и доступный объект наблюдений для экотуристов (рис. 6). Таким образом, создание Нижне-Зейской и Селемджинской ГЭС приведёт к тотальному снижению транспортного и рекреационного потенциала Приамурья.

Новые крупные ГЭС дадут дополнительную электроэнергию, которой на российском Дальнем Востоке и без того избыток. Не вызывает сомнений, что бо́льшая её часть пойдёт на экспорт. Без интенсивного развития местных энергоёмких производств это может иметь нежелательные последствия. В средствах массовой информации бытует мнение, что поставки электроэнергии в Китай представляют собой не экспорт сырья, а продажу высокотехнологичного товара. Однако, по сути, электроэнергия, вырабатываемая ГЭС, — это сырьё, получение которого сопряжено со значительными социально-экологическими издержками. Насколько это выгодно для Приамурья? Нельзя не учитывать, что резкий рост экспорта электроэнергии в КНР по ценам ниже тарифов на Дальнем Востоке снизит конкурентоспособность отечественных товаров по сравнению с китайскими и тем самым косвенно воспрепятствует гармоничному развитию хозяйства Приамурья, в первую очередь малого бизнеса. Все упомянутые негативные социально-экологические и социально-экономические факторы, связанные с Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС, инициируя отток местного населения с севера Амурской области, существенно затруднят устойчивое развитие региона в целом.

Практика показывает, что энергетики всеми силами стараются избегать холостых сбросов, лишаящих их дополнительных выплат за электроэнергию. По этой причине летом 2013 г. сбросы с плотины Зейской ГЭС привели к подтоплению населённых пунктов в нижнем бьефе. Приточность в Зейское во-

дохранилище стала быстро увеличиваться в начале июля 2013 г., однако только через месяц, 2 августа, был несколько увеличен сброс воды, но не настолько, чтобы снизить уровень водохранилища и максимально освободить резервную ёмкость для приёма пика паводка. В итоге к моменту пика уровень воды в водохранилище достиг критической отметки, представлявшей угрозу безопасности плотины. Вынужденный сброс усугубил критическую ситуацию в нижнем бьефе. По аналогичному сценарию разворачивались события в 2007 г., когда при среднем уровне приточности аварийные сбросы воды с Зейской ГЭС подтопили г. Зею и пос. Овсянку. Похожие ситуации не исключены и на новых ГЭС.

Времена, когда энергия ГЭС была дешевле и надёжнее других видов энергии, безвозвратно ушли в прошлое. По данным Международного агентства по возобновляемой энергии (International Renewable Energy Agency, IRENA), за период с 2011 по 2022 г. стоимость строительства новых ГЭС в среднем увеличилась на 60%, а стоимость производимой ими энергии — более чем на 20% [21]. В Приамурье эти приросты будут заведомо выше из-за недостаточного развития инфраструктуры, прежде всего транспортной. При этом стоимость энергии от других возобновляемых источников существенно упала, сделав новые ГЭС менее экономичными, чем солнечные (СЭС) или наземные ветряные электростанции (ВЭС). В мире и в сопредельном Китае ежегодный ввод мощностей новых ГЭС в 10 раз меньше, чем СЭС и ВЭС, и, по данным Всемирного энергетического агентства, продолжает снижаться [22]. Напомним, что Китай — единственная страна, чей гидроэнергетический потенциал (не путать с валовыми запасами возобновляемых водных ресурсов!) выше, чем в России, причём в 2.5 раза.

Нарастающие климатические изменения привели не только к более частым и острым засухам, но и крупным наводнениям, что резко снизило надёжность ГЭС как стабильного источника энергии в большинстве регионов мира. Кроме того, создание каждой крупной ГЭС растягивается на многие годы и обычно связано с перерасходом средств и отложенными сроками сдачи объектов. Нет сомнений, что через 20 лет крупные равнинные ГЭС станут восприниматься как памятники — рудименты навсегда ушедшей индустриальной эпохи, а факты их строительства в XXI в. — как свидетельство экономической и социальной близорукости тех, кто принимал такие решения. В связи со всем вышесказанным строительство новых ГЭС как способ перспективного развития Дальнего Востока России кажется недалёковидным и рискованным предприятием, особенно ввиду турбулентности современной политической и экономической ситуации.

Несостоятельность попыток занижения экологической и социальной опасности ГЭС. В настоящее время проектно-изыскательским институтом АО “Ленгидропроект”, входящим в группу ПАО “РусГидро”, осуществляется разработка проектной документации строительства Нижне-Зейской и Селемджинской ГЭС [23–25]. “РусГидро” при “проектировании новых гидроузлов предприняты все возможные меры для минимизации их влияния на окружающую среду. Так, по сравнению с более ранними проектными проработками, створ Нижне-Зейской ГЭС будет сдвинут на 45 км выше по течению, а уровень водохранилища Селемджинской ГЭС снижен на 10 м, до отметки 215 м”. Необходимо уточнить, что речь идёт о нормальном подпорном уровне (НПУ). Однако при оценке воздействия Селемджинской ГЭС на наземные экосистемы наиболее важен форсированный подпорный уровень (ФПУ) — 227.7 м, который водохранилище будет регулярно набирать согласно своему основному назначению по борьбе с паводками. Кроме того, напомним гидропроектировщикам, что, если “все возможные меры для минимизации их [двух ГЭС. — Авт.] влияния на окружающую среду” оказываются совершенно неудовлетворительными, то такие проекты надо отвергать, а не пытаться защищать любыми средствами, в том числе путём искажения фактов.

Эксперты, участвовавшие в круглом столе Общественной палаты РФ, отметили, что снижение НПУ Селемджинского водохранилища с 225 до 215 м не уменьшит катастрофических последствий для Норского заповедника, редких и находящихся под угрозой исчезновения видов птиц и группировки сибирской косули, так как площадь затопления при ФПУ изменится несущественно — с 990 до 940.81 км³, а миграционные пути копытных будут

уничтожены при любом проектном решении. Это значит, что постоянному или временному затоплению и подтоплению с последующей деградацией экосистем подвергнется не 1.5% территории заповедника, а не менее 10–15%. Наиболее ценные пойменные и долинные биотопы будут затоплены или превратятся в безжизненные заболоченные пустоши с торчащими стволами погибших деревьев (рис. 7). В летние сезоны с малым количеством осадков зона осушки станет местом частого возникновения пожаров, как это происходит в окрестностях Зейского водохранилища.

Предлагаемый перенос створа Нижне-Зейского гидроузла на 45 км вверх по течению также не окажет необходимого природоохранного эффекта в связи с тем, что миграционные пути косуль всё равно полностью нарушатся в результате гидростроительства: животные будут массово гибнуть как на водохранилищах, так и в незамерзающих полыньях ниже плотин.

Помимо внесения изменений в проекты Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС, проектировщики предполагают разработку комплекса компенсационных мероприятий для животного мира, как это было сделано для зон влияния Бурейского и Нижне-Бурейского водохранилищ. Следует обратить особое внимание на то, что живая природа бассейна среднего течения Зеи (включая среднее и нижнее течение её притока Селемджи) настолько уникальна и уязвима, что в случае гидростроительства не может быть сохранена никакими компенсационными мероприятиями и (или) изменениями проектов. Ключевое значение рассматриваемой территории для поддержания экологической устойчивости Приамурья, в частности, определяется наличием: последней крупной мигрирующей популяции сибирской косули; богатейшего очага видового разнообразия редких охраняемых видов птиц; двух феде-



Рис. 7. Погибший лес в зоне колебания уровня и подтопления равнинной части Зейского водохранилища
Фото С. Подольского

³ Цит. по: Нижне-Зейская ГЭС на р. Зея. Декларация о намерениях строительства Нижне-Зейской ГЭС на р. Зея. Книга 1. Текстовая часть. 2229-1т1. АО “Ленгидропроект”, 2021.

ральных ООПТ (Норский заповедник, федеральный заказник “Орловский”); обширных водно-болотных массивов (Норские и Альдиконские мари); неморальных (дубовые и дубово-берёзовые леса) и экстразональных (остепнённые суходольные луга) экосистем на крайнем северном пределе распространения; Зейского и Селемджинского экологических коридоров, поддерживающих региональное биоразнообразие.

Особая уязвимость природных комплексов бассейна средней Зеи, принципиально исключающая возможность реального снижения ущерба от гидростроительства, связана с несколькими основными факторами: все миграционные пути косуль направлены поперёк участков долин Зеи, Селемджи и Норы, нарушаемых гидросооружениями, в результате чего животные рано или поздно неминуемо погибнут, потеряв доступ к местам размножения и зимовок; наиболее ценные экосистемы и места обитания популяционных группировок краснокнижных видов птиц, находящиеся на крайнем северном пределе распространения, будут затоплены или подтоплены; Зейский и Селемджинский экологические коридоры, обеспечивающие повышенное биоразнообразие Северного Приамурья, будут в основном затоплены; в результате прямого и (или) косвенного воздействия водохранилищ две федеральные ООПТ (Норский заповедник и федеральный заказник “Орловский”) не смогут выполнять свои природоохранные функции; обширные болота Норских и Альдиконских марей, способствующих естественному регулированию стока, будут уничтожены; резкое изменение гидрологического режима приведёт к деградации пойменных экосистем в нижнем бьефе больших плотин.

В рамках “Социально-экологического мониторинга зоны влияния Бурейской и Нижне-Бурейской ГЭС” [26] коллективом сотрудников Зейского и Хинганского заповедников при участии Института водных проблем РАН и Института водных и экологических проблем ДВО РАН был разработан и реализован комплекс предложений по снижению ущерба животному миру. Он включал расширение площади ООПТ, а также систему биотехнических и охранных мероприятий. Однако ситуация на Бурее коренным образом отличалась от того, что ожидается в зоне влияния Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ. Долина Буреи расположена значительно южнее и восточнее, поэтому не играет столь весомой роли в распространении дальневосточных видов к северу от основных ареалов. В непосредственной близости от Бурейского каскада ГЭС нет федеральных ООПТ и уникальных гнездовых популяций краснокнижных птиц. На Бурее нет столь выраженных и массовых миграций косуль, к тому же их сезонные кочёвки направлены вдоль береговой водохранилищ: животные преодолевают лишь отдельные заливы искусственных водоёмов, которые можно обойти. Однако даже там, на

заливах отмечен случай гибели сотен косуль (залив Чеугды, декабрь 2006 г.) — на Зее, Селемдже и Норе их погибли многие тысячи (вплоть до фактического исчезновения популяции). По мнению самих разработчиков компенсационных мероприятий на Бурее (среди которых один из авторов настоящей статьи), аналогичные меры в зонах влияния Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС не будут иметь практически никакого природоохранного эффекта.

Таким образом, очевидно, что изменения, предлагаемые АО “Ленгидропроект” к внесению в проекты Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС, и какие-либо иные, якобы компенсационные мероприятия не могут реально снизить негативное влияние этих сооружений на ООПТ, животный мир и окружающую среду. Они носят косметический характер, маскируя предстоящую неизбежную экологическую катастрофу регионального масштаба. Единственный выход — поиск альтернативных путей решения региональных проблем паводков и развития энергетики.

Альтернативные решения проблем паводков и развития энергетики в Приамурье. Насколько необходимо возведение Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС, сопряжённое со столь значительными экологическими и социально-экономическими издержками? В настоящее время большинство экспертов считает, что энергии Зейской, Бурейской и Нижне-Бурейской ГЭС достаточно для обеспечения Дальнего Востока на обозримую перспективу. Подтверждением этому служит практически не дающий прибыли экспорт электроэнергии в КНР.

Основной целью планируемого строительства называют “защиту населения от экстремальных наводнений”. Водоохранилища способны противостоять краткосрочным высоким паводкам при среднем объёме стока. Однако возможность предотвращать наводнения в Приамурье при высоком и экстремальном стоке более чем сомнительна. Для Амура и его притоков характерны колоссальные естественные колебания стока, максимальные для нашей страны — до 270 крат (от 150 до 40 000 м³/сек). Обратимся к фактам. Самое большое на Дальнем Востоке Зейское водохранилище (резервная ёмкость до 20 км³) смогло устранить угрозу частых наводнений только в г. Зея, расположенном сразу за плотиной. Однако при катастрофических паводках даже этот населённый пункт до сих пор подтапливается. Три крупных водохранилища — Зейское, Бурейское и Нижне-Бурейское — не срезают высокие паводки на большом удалении от плотин. Проведённые в Институте водных проблем РАН расчёты показали, что водохранилища двух новых ГЭС не смогут остановить наводнения в густонаселённых районах Приамурья. Во время экстремальных паводков снижение уровня благодаря этим водохранилищам в районе Благовещенска и Хабаровска может составить от нескольких до первых десятков сантиме-

тров. При экстремальных паводках этот результат будет практически незаметен.

В рамках логики, которая лежит в основе однобокой стратегии перманентного гидростроительства, следует ожидать серийного проектирования и создания очередных плотин, вплоть до превращения всех крупных левобережных притоков Амура в сплошные каскады водохранилищ. Возможные негативные социально-экологические последствия хорошо известны на примере Волги. Но здесь добавится ещё и уничтожение уникального биоразнообразия Приамурья, связанного с речными долинами. При таком сценарии в верхнем бьефе под затопление попадут основные площади наиболее продуктивных сельскохозяйственных и охотничьих угодий, будет ликвидировано множество посёлков. В нижнем бьефе самые продуктивные долинные пахотные земли, выведенные из-под регулярного влияния паводков, быстро утратят плодородие, пойменные луга и леса постепенно деградируют. Нельзя забывать о том, что периодические высокие паводки – важнейшая природная особенность Приамурья, обеспечивающая повышенное биоразнообразие и продуктивность природных комплексов. В результате непродуманного гидростроительства изначально богатейший регион с эталонным состоянием среды обитания может стать малопригодным для жизни людей и лишится перспектив устойчивого развития.

По мнению экспертов, усилия следует акцентировать не на борьбе с редкими экстремальными наводнениями, которые являются характерной природной особенностью Приамурья, а на заблаговременном предотвращении их негативных социальных последствий. Для этого необходим комплексный подход, включающий несколько основных направлений:

- зонирование территории по степени угрозы наводнений с учётом прогнозируемых изменений климата, с разработкой научно обоснованных норм для каждой зоны, включая запрет на капитальное строительство в незащищённых местах регулярного затопления; составление норм для проектов зданий и планировки территорий, минимизирующих ущерб от наводнений;
- переселение людей из наиболее опасных при наводнениях мест;
- целесообразное огораживание дамбами поселений, объектов инфраструктуры, хозяйственных построек и т.п.;
- расширение пропускной способности водотока под инженерными сооружениями (и около них) в поймах крупных рек (мост у Хабаровска и др.);
- создание в верховьях притоков второго порядка относительно небольших водохранилищ, не препятствующих сохранению биоразнообразия, усиливающих естественные водорегулирующие свойства крупных водно-болотных массивов;

- оптимизация использования противопаводковых ёмкостей существующих водохранилищ;
- заблаговременное планирование попусков из водохранилищ, включая экологические попуски;
- модернизация и радикальное расширение системы гидрометеорологического мониторинга за счёт увеличения числа гидропостов, активизации дистанционных наблюдений, использования современных методов обработки информации, в том числе с целью повышения оперативности и точности прогнозов наполняемости водохранилищ;
- модернизация и развитие системы оповещения населения;
- радикальное развитие системы страхования от последствий наводнений;
- укрепление группировки МЧС, в частности, повышение её мобильности и оснащённости техническими средствами.

Все эти направления связаны между собой общей целью и зависят от результативности мероприятий по каждому из них. Учёт возможностей и эффективности составляет суть системного анализа (междисциплинарного и межотраслевого) как основы планирования действий в рамках комплексного подхода.

При комплексном подходе к борьбе с паводками первоочередной задачей “РусГидро” должен стать ремонт и (или) модернизация водосброса Зейской ГЭС. Из-за неисправности данного элемента плотины не используется 6 км³ противопаводковой ёмкости Зейского водохранилища. Это примерно равно аналогичному показателю проектируемых Селемджинского и Нижне-Зейского водохранилищ вместе взятых: с учётом уничтожения Норских и Альдиконских марей (естественный регулятор стока, эквивалентный ёмкости около 1.8 км³) суммарный противопаводковый эффект не превысит 5–6 км³. Иными словами, ремонт или модернизация водосброса Зейской ГЭС приведёт к тем же результатам, что и организация водохранилищ для двух новых ГЭС, только с несопоставимо меньшими финансовыми затратами и без каких-либо экологических издержек. Более того, такая модернизация обеспечит возможность открытия водосброса при уровне водохранилища ниже 317.5 м для экологических попусков – управляемых паводков с целью поддержания биоразнообразия пойменных экосистем и повышения продуктивности сельскохозяйственных угодий в нижнем бьефе.

Отказ от ремонта или модернизации плотины Зейской ГЭС в пользу создания двух новых, весьма дорогостоящих и экологически крайне опасных водохранилищ, может отвечать лишь сиюминутным, узковедомственным интересам гидростроителей. Однако такое решение будет не только угрожать региональной экологической безопасности, но и в корне противоречить общегосударственным

целям. В стремлении построить две новые ГЭС узнаётся старая ушербная практика планового хозяйства: отрасль хочет заполучить как можно более крупный проект, чем дороже — тем лучше, ведь платить за него будет государство. И в данном случае платить будет всё то же государство: «РусГидро» — государственная компания, более 60% которой принадлежит Российской Федерации в лице Федерального агентства по управлению государственным имуществом. Также подконтрольный государству ВТБ владеет 12.37% акций «РусГидро» [27, с. 1]. Мы отнюдь не против государственной собственности, в том числе в форме владения акциями ПАО, но необходимо изменить формы управления такими организациями, чтобы их интересы совпадали с государственными, а не противоречили им.

Для увеличения энергообеспеченности Дальнего Востока с перспективой развития местных производств есть альтернативные варианты размещения ГЭС, отвечающие предложенному взвешенному подходу, поручению Президента РФ [4] и соображениям экологической безопасности: Экимчанский и Русиновский створы в верховьях Селемджи; Верхне-Ниманский и Нижне-Ниманский створы на правом притоке Буреи — реке Ниман. При оценке влияния проектируемых водохранилищ на паводки в нижнем бьефе необходимо учитывать не только их резервную ёмкость, но и естественный водорегулирующий потенциал водосборных бассейнов, прежде всего крупных болотных массивов. Аккумулируя часть стока верховьев Селемджи в своей резервной ёмкости, Экимчанское и (или) Русиновское водохранилища увеличат водорегулирующий потенциал Альдиконских и Норских марей, расположенных ниже по течению. Аналогичная ситуация с Ниманскими ГЭС, расположенными выше Ургальских марей. Предварительные расчёты показали, что противопаводковый эффект альтернативного сценария с Экимчанской и Нижне-Ниманской ГЭС будет практически эквивалентен варианту с Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС (около 5.8 км³). Возможно, Русиновская и Нижне-Ниманская ГЭС будут более перспективными. При любом из упомянутых сценариев удастся избежать ущерба ООПТ, редким видам животных, мигрирующим косякам и обойтись без значительных социально-экологических издержек. Реализация альтернативного варианта, с природно-техногенными системами из водохранилищ и крупных болотных массивов, может стать примером инновационного подхода. К тому же, по нашим оценкам, он будет дешевле минимум на 15 млрд руб.

Для надёжного обеспечения энергетической безопасности Дальнего Востока и Забайкальского края на обозримую перспективу необходимо рассмотреть возможности развития различных источников генерации. Известно, что оптимальная устойчивость региональных энергосистем достигается при максимальной диверсификации источников энергии.

В Приамурье уже функционируют три крупные ГЭС (Зейская, Бурейская и Нижне-Бурейская), способные выполнять генерирующие и регулирующие функции. Дальнейшая ориентация развития энергосистемы исключительно на ГЭС очень сомнительна, особенно в условиях нарастающей нестабильности климата и стока. Логично рассмотреть и возможность строительства АЭС, что особенно актуально ввиду наличия у России уникальной технологии использования ядерных отходов как вторичного сырья. В этом контексте интересны планы «Росатома» по строительству малых АЭС близ Могочи Забайкальского края и в посёлке Восточный Тындинского муниципального округа Амурской области [28]. Необходимо отметить, что при современном уровне обеспечения безопасности АЭС не наносят ощутимого ущерба окружающей среде.

Можно констатировать, что предотвратить негативные социальные последствия паводков и развивать энергетику в Приамурье можно и без строительства Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС, сопряжённого с недопустимыми экологическими и социально-экономическими издержками. Напротив, альтернативные варианты будут способствовать устойчивому развитию региона при безусловном обеспечении экологической безопасности.

* * *

ПАО «РусГидро» позиционируется как экологически ответственная компания, и для этого есть реальные основания: участие в создании Бурейского природного парка, поддержка экопросветительской деятельности заповедников, финансирование экологического мониторинга в зоне влияния Бурейского каскада ГЭС. Однако строительство Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС в корне подорвёт этот положительный имидж. Неизбежен катастрофический кумулятивный эффект от взаимного усиления негативного влияния на природу и социум, что, кроме того, дискредитирует позитивную идею Президента РФ о действенной помощи населению Амурской области. Угроза экологической безопасности реальна не только на региональном, но и на федеральном уровне. Попытка техногенного устранения паводков, являющихся неотъемлемой особенностью природы Приамурья, по своему разрушительному потенциалу сопоставима с былыми планами переброски рек. Стоит ли возвращаться к давно изжившей себя стратегии грубого покорения природы?

Ответ становится очевидным, если обратить внимание на последние программные заявления В.В. Путина, касающиеся долгосрочной экологической стратегии России: уменьшение загрязнения водных объектов минимум в два раза; сбережение и охрана лесных богатств Сибири и Дальнего Востока; работа по охране ООПТ; организация реабилитационных центров для диких животных;

расширение опорной транспортной сети на внутренних водоёмах; развитие внутреннего туризма. Сооружение Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС противоречит абсолютно всему: оно приведёт к недопустимому крупномасштабному загрязнению водоёмов фенолами; затоплению и подтоплению не менее 1.5 тыс. км² лесных угодий; частичному затоплению и (или) кардинальному нарушению Норского заповедника и Орловского заказника; гибели последней мигрирующей популяции сибирских коз, без какой-либо возможности реабилитации; резко затруднению судоходства на Зее и Селемдже; значительному снижению рекреационного потенциала Приамурья.

В настоящее время ПАО «РусГидро» продолжает планомерную работу по проектированию Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС, поддерживаемую информационной компанией в центральных СМИ. Обоснованные опасения экспертного сообщества и местного населения фактически игнорируются (хотя региональные СМИ, лучше знакомые с интересами и мнениями местного населения, как правило, не замалчивают опасения экологов [8, 9, 23, 25]). Вносимые в проекты изменения и планы компенсационных мероприятий носят косметический характер. Пытаясь доказать безальтернативность проектов Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС, гидроэнергетики опираются на два аргумента: утверждённый перспективный план, который сами же создавали без привлечения внешних экспертов-экологов, и поручение Президента РФ [4] «рассмотреть вопрос о строительстве объектов гидрогенерации... на реках Ниман и Селемджа», как бы не замечая указания по Ниману, где возможны экологически приемлемые альтернативные варианты гидростроительства.

В отсутствие эффективных рычагов воздействия со стороны научной общественности и местного населения, руководство ПАО «РусГидро» вольно или невольно ведёт дело к неизбежной экологической катастрофе и социальной нестабильности в регионе. По большому счёту сами энергетики в итоге окажутся в убытке: резко негативный общественный резонанс может поставить крест на дальнейшем освоении ресурсов Дальнего Востока и Сибири, где пока используется не более 30% гидроэнергетического потенциала [29]. Эффективную защиту от наводнений в бассейне Амура (как, впрочем, и везде, где они угрожают безопасности людей) можно обеспечить только последовательной реализацией системы научно обоснованных мероприятий.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема № FMWZ-2022-0002, Государственная регистрация 122041100236-4).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Емельяненко А.Ф.* (2006) Николай Лавёров: Надо находить способ переплавить эмоции в аргументы // Российская газета – Неделя – Федеральный выпуск. 08.09.2006 г. <https://rg.ru/2006/09/08/laverov.html?ysclid=lvnvt45etq740867840>
Emelianenkov A.F. (2006) Nikolay Laverov: It is necessary to find a way to melt emotions into arguments. Rossiyskaya Gazeta – Nedelya – Federal Issue. (In Russ.)
2. *Прутвиц Н.* (2006) Байкал. Труба. Наука // Наука в Сибири. 17.06.2006 г. № 31–32 (2566–2567). <http://www.sbras.ru/HBC/hbc.phtml?20+384+1>
Pritvits N. (2006) Baikal. Tube. Science. Science in Siberia, no. 31–32. (In Russ.)
3. Совещание о ситуации с паводками и пожарами в регионах. <http://kremlin.ru/events/president/news/66335>
A meeting on the situation with floods and fires in the regions. (In Russ.)
4. Перечень поручений по итогам совещания о ситуации с паводками и пожарами в регионах и ходе ликвидации их последствий. <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/66398>
A list of instructions following the meeting on the situation with floods and fires in the regions and the course of eliminating their consequences. (In Russ.)
5. Рекомендации Общественной палаты Российской Федерации по вопросу строительства объектов гидрогенерации в бассейне реки Амур, в том числе на реках Ниман и Селемджа. <https://files.oprf.ru/storage/documents/rekom-stroitelst-ges-amur.pdf>
Recommendations of the Public Chamber of the Russian Federation on the issue of construction of hydro-power generation facilities in the Amur River basin, including on the Niman and Selemdzha rivers. (In Russ.)
6. Вопросы обеспечения экологической безопасности в связи с планами строительства двух ГЭС в Амурской области обсудили в Общественной палате // Новости Российской академии наук в Telegram. <https://new.ras.ru/activities/news/voprosy-obespecheniya-ekologicheskoy-bezopasnosti-v-svyazi-s-planami-stroitelstva-dvukh-ges-v-amursk/>
Issues of ensuring environmental safety in connection with plans to build two hydroelectric power plants in the Amur Region were discussed in the Public Chamber // News of the Russian Academy of Sciences in Telegram. (In Russ.)
7. *Стрелкова О.* Новые ГЭС в Амурской области учёные назвали стратегией грубого покорения природы. <https://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?id=2724a43e-eb5e-40f7-9a12-a2f3df99ee28>
Strelkova O. Scientists called the new hydroelectric power plants in the Amur region a strategy of rough conquest of nature. (In Russ.)

8. Экологическую безопасность при строительстве новых ГЭС в Приамурье обсудили в Москве // Порт Амур. 17.01.2024 г. <https://portamur.ru/~wQJuB>
Environmental safety during the construction of new hydroelectric power plants in the Amur region was discussed in Moscow. Port Amur. 17.01.2024. (In Russ.)
9. Об экологических рисках строительства новых ГЭС в Приамурье рассказали в Общественной палате РФ члены Экспертного совета по заповедному делу // Экспертный совет по заповедному делу. 17.01.2024 г. <https://zapovedncouncil.ru/ob-ekologicheskikh-riskah-stroitelstva-novykh-ges-v-priamure-rasskazali-v-obshhestvennoj-palate-rf-chleny-ekspertnogo-soveta-po-zapovednomu-delu/>
Members of the Expert Council on Nature Reserves spoke about the environmental risks of building new hydroelectric power plants in the Amur Region in the Public Chamber of the Russian Federation // Expert Council on Nature Reserves. 2024, January 17. (In Russ.)
10. *Подольский С.А., Коцюк Д.К., Антонов А.И., Париллов М.П.* (2017) Оценка возможных угроз позвоночным животным при гидростроительстве в Дальневосточном регионе // Экосистемы: экология и динамика. № 2. С. 103–132.
Podolsky S.A., Kotsyuk D.K., Antonov A.I., Parilov M.P. (2017) Assessment of possible threats to vertebrates in hydraulic engineering in the Far Eastern region. Ecosystems: ecology and dynamics, no. 2, pp. 103–132. (In Russ.)
11. *Подольский С.А., Игнатенко С.Ю., Игнатенко Е.В. и др.* (2016) Методология организации и ведения мониторинга биоразнообразия в зонах влияния ГЭС на примере крупных гидроузлов Приамурья // Вестник ДВО РАН. № 1 (185). С. 15–25.
Podolsky S.A., Ignatenko S.Yu., Ignatenko E.V. et al. (2016) Methodology of organization and monitoring of biodiversity in the zones of influence of hydroelectric power plants on the example of large hydroelectric power plants of the Amur region. Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, no. 1 (185), pp. 15–25. (In Russ.)
12. *Подольский С.А.* (2023) Экологическая опасность проектов Селемджинской и Нижне-Зейской ГЭС // Экосистемы: экология и динамика. № 2. С. 176–190.
Podolsky S.A. (2023) Environmental hazards of the Selemdzhinskaya and Nizhne-Zeiskaya HPP projects. Ecosystems: ecology and dynamics, no. 2, pp. 176–190. (In Russ.)
13. *Малик Л.Г.* (1990) Географические прогнозы последствий гидроэнергетического строительства в Сибири и на Дальнем Востоке. М.: ИГ АН СССР.
Malik L.G. (1990) Geographical forecasts of the consequences of hydropower construction in Siberia and the Far East. Moscow: Institute of Geography of the USSR Academy of Sciences. (In Russ.)
14. *Данилов-Данильян В.И., Новикова Н.М., Назаренко О.Г.* (2024) Экологические последствия создания и спуска водохранилищ в степной зоне // Вестник РАН. № 4. С. 330–347.
Danilov-Danilyan V.I., Novikova N.M., Nazarenko O.G. (2024) Environmental consequences of the creation and descent of reservoirs in the steppe zone. Herald of the Russian Academy of Sciences, no. 4. pp. 330–347. (In Russ.)
15. *Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е.* (2012) Оценка последствий гидротехнического воздействия на экосистемы пойменных гидроморфных и полуавтоморфных территорий // Вопросы географии. Сб. 134. Актуальная биогеография. С. 298–313.
Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E. (2012) Assessment of the consequences of hydrotechnical impact on ecosystems of floodplain hydromorphic and semi-automorphic territories. Questions of geography, iss. 134, pp. 298–313. (In Russ.)
16. *Дарман Ю.А., Колобаев Н.Н.* (1993) Влияние Зейского водохранилища на копытных животных // Явления и процессы в природном комплексе Зейского заповедника. М. С. 63–85.
Darman Yu.A., Kolobaev N.N. (1993) The influence of the Zeya reservoir on ungulates. Phenomena and processes in the natural complex of the Zeya Reserve. Moscow. Pp. 63–85. (In Russ.)
17. *Антонов А.И., Яковлев А.А., Подольский С.А.* (2015) Видовой состав птиц среднего течения реки Зeya (Амурская область) // Фауна Урала и Сибири. Региональный фаунистический журнал. № 2. С. 23–43.
Antonov A.I., Yakovlev A.A., Podolsky S.A. (2015) Species composition of birds of the middle reaches of the Zeya River (Amur region). Fauna of the Urals and Siberia. Regional Faunal Journal, no. 2, pp. 23–43. (In Russ.)
18. *Сапаев В.М., Дарман Ю.А., Швец В.Г.* (1990) Строительство Селемджинской ГЭС и проблемы сохранения мигрирующей популяции косули. Хабаровск: ИВЭП ДВО АН СССР.
Sapaev V.M., Darman Yu.A., Shvets V.G. (1990) Construction of the Selemdzhinskaya HPP and problems of conservation of the migratory roe deer population. Khabarovsk: Institute of Water and Ecology Problems of the Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences. (In Russ.)
19. *Игнатенко С.Ю., Подольский С.А., Былков А.Ф.* (2007) Мониторинг гибели мигрирующих косуль в зоне влияния Бурейского водохранилища и расчёт ущерба близлежащим ООПТ // Материалы VIII дальневосточной конференции по заповедному делу. Т. 1. Благовещенск: БГПУ. С. 151–159.
Ignatenko S.Yu., Podolsky S.A., Bylkov A.F. (2007) Monitoring the death of migrating roe deer in the zone of influence of the Bureysky reservoir and calculating damage to nearby protected areas. Materials of the VIII Far Eastern Conference on Conservation, vol. 1. Blagoveshchensk: BSPU. Pp. 151–159. (In Russ.)

20. ru.wikipedia.org/wiki/Население_Амурской_области
21. Затраты на производство возобновляемой энергии в 2021 году. <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021> Renewable energy production costs in 2021. (In Russ.)
22. World Energy Investment 2023. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/54a781e5-05ab-4d43-bb7f-752c27495680/WorldEnergyInvestment2023.pdf>
23. Приморский тайфун ускорил проектирование Нижне-Зейской и Селемджинской ГЭС. <https://www.amur.life/news/2023/08/23/primorskiy-tayfun-uskoril-proektirovanie-nizhne-zeyskoy-i-selemdzhinskoy-ges?ysclid=lv57k9p77x510222839>
The typhoon in Primorye accelerated the design of the Nizhne-Zeyskaya and Selemzhinskaya hydroelectric power plants. (In Russ.)
24. “РусГидро” раскрыло параметры новых ГЭС в Приамурье. Идёт проектирование станций // Порт Амур. 11.09.2023 г. <https://portamur.ru/news/detail/rusgidro-raskryilo-parametryi-novyih-ges-v-primamure/?ysclid=lv57orqje96916402>
RusHydro has revealed the parameters of new hydroelectric power plants in the Amur region. Stations are being designed. Amur Port. 11.09.2023. (In Russ.)
25. Павлова Е. (2024) Зачем в Амурской области планируют строить две новые ГЭС // Амурская правда. 04.05.2024 г. <https://ampravda.ru/2023/10/04/0124786.html?ysclid=lv56xvavrp714976748>
Pavlova E. (2024) Why are they planning to build two new hydroelectric power plants in the Amur Region. Amurskaya Pravda. 04.05.2024. (In Russ.)
26. Подольский С.А., Игнатенко С.Ю., Дарман Ю.А. и др. (2004) Проблемы охраны и изучения диких животных при создании горных водохранилищ на примере Бурейского гидроузла / Под ред. С.А. Подольского. М.: РАСХН.
Podolsky S.A., Ignatenko S.Yu., Darman Yu.A. et al. (2004) Problems of protection and study of wild animals in the creation of mountain reservoirs on the example of the Bureysky hydroelectric complex / Ed. by S.A. Podolsky. Moscow: Russian Academy of Agricultural Sciences. (In Russ.)
27. Кондратышин Р. (2023) Прогноз по акциям ПАО “РусГидро” // Conomy. 01.06.2023 г. <https://conomy.ru/analysis/articles/109?ysclid=lv5dijfbb338950032>
Konratyshin R. (2023) Forecast for shares of PJSC RusHydro. Conomy. 01.06.2023. (In Russ.)
28. Кондратьев Н. (2024) Две АЭС планируется возвести в Забайкальском крае // Общество. 01.03.2024 г. zab.ru/news/171661
Konratiev N. (2024) Two nuclear power plants are planned to be built in the Trans-Baikal Territory. Society. 03/01/2024. (In Russ.)
29. Асарин А.Е., Данилов-Данильян В.И. (2006) Гидроэнергетический потенциал России // Энергетика России: проблемы и перспективы. Труды Научной сессии РАН. М.: Наука.
Asarin A.E., Danilov-Danilyan V.I. (2006) Hydropower potential of Russia. Russian energy sector: problems and prospects. Proceedings of the Scientific Session of the Russian Academy of Sciences. Moscow: Nauka. (In Russ.)

AN INTEGRATED APPROACH TO SOLVING THE FLOODS PROBLEM IN THE AMUR BASIN

V.I. Danilov-Danilyan^{a,*}, S.A. Podolsky^{a,**}

^aInstitute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: vidd38@yandex.ru

**E-mail: sergpod@mail.ru

Devastating floods in Russia most often occur in the Amur basin. To protect against these natural disasters, it is planned to build hydroelectric power stations, as their reservoirs are able to intercept part of the flood. Of the possible options for their placement, PJSC “RusHydro” chose the gates in the middle reaches of the Selemdzha and in the lower reaches of the Zeya. The article analyzes the environmental consequences of the construction of two hydroelectric power plants and provides arguments about the unacceptability of these projects. The authors put forward a reasonable opinion that alternative options are environmentally safe and at the same time no more expensive. Focusing on flood protection only through hydraulic engineering will not be able to provide an acceptable solution to the problem, therefore it is necessary to resort to other systemic methods.

Keywords: Amur River, flood protection, reservoir, Selemzhinskaya HPP, Nizhne-Zeiskaya HPP, environmental consequences, ecosystem, specially protected natural area, red book species of animals, alternative option.

СЕЙСМОАКУСТИКА ШЕЛЬФОВЫХ МОРЕЙ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МОНИТОРИНГА

© 2024 г. А.Л. Собисевич^{а,*}, В.П. Дмитриченко^{б,**}

^аИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

^бАО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: sobisevich@yandex.ru

**E-mail: dmitrichenko-v@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.05.2024 г.

После доработки 10.06.2024 г.

Принята к публикации 04.07.2024 г.

В статье представлены результаты разработки научных основ технологии пассивного геогидроакустического мониторинга покрытых льдом акваторий, включая теоретические исследования условий формирования и распространения волновых полей, порождаемых наведёнными геодинамическими процессами в слоистой структуре «литосфера – гидросфера – ледовый покров». Рассмотрены задачи, касающиеся создания инновационных, экологически безопасных геофизических технологий оконтуривания локальных неоднородностей, а также конструирования опытных образцов, лабораторно-стендовых и натуральных испытаний рабочих макетов вмораживаемых геогидроакустических буёв нового поколения. Особое внимание уделяется научно-практическому заделу в области развития методов пассивного геогидроакустического мониторинга северных морей России в условиях ледовитости.

Ключевые слова: слоистая геофизическая среда, Арктическая зона РФ, арктический шельф, геогидроакустические поля, поверхностные волны, ледовый покров, изгибно-гравитационные волны, сейсмогидроакустические дрейфующие ледовые антенны, пассивные сейсмотомаграфические методы, мониторинг локальных неоднородностей, геоэкология.

DOI: 10.31857/S0869587324080045, EDN: FDERCE

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, утверждённая Указом Президента РФ от 28 февраля 2024 г., определила приори-



СОБИСЕВИЧ Алексей Леонидович – член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией 703 ИФЗ РАН. ДМИТРИЧЕНКО Владимир Петрович – кандидат технических наук, начальник отделения АО «Концерн «МПО – Гидроприбор»».

теты дальнейшего укрепления позиций нашей страны в области экономического, научного и военного освоения суверенных арктических территорий, ресурсный потенциал которых позволяет отнести их к наиболее перспективным регионам по добыче нефти, природного газа и других полезных ископаемых [1–6]. Важно отметить, что применение классических методов промышленной сейсморазведки при освоении месторождений полезных ископаемых на континентальном шельфе Арктики может быть осложнено ледовыми условиями, а использование активных источников – необходимостью сохранить биоразнообразие и краснокнижных морских обитателей [7, 8]. В то же время гео- и гидроакустические волновые поля, порождаемые наведёнными геодинамическими процессами в сложно построенной геофизической среде, несут полезную информацию, способствующую развитию новых методов пассивного сейсмоакустического мониторинга локальных неоднородностей и запасов углеводородов как на шельфе, так и в других, покрытых сплошным ледовым покровом районах Северного Ледовитого океана [9–12].

Российские учёные и специалисты всесторонне изучили различные сейсмоакустические приёмники, включая волоконно-оптические системы [13], и продемонстрировали их возможности для регистрации сейсмо- и гидроакустических волновых процессов на поверхности ледового покрова [13, 14]. Были предложены новые технические решения, которые позволяют организовать долговременные наблюдения на покрытых льдом акваториях путём создания вмораживаемых дрейфующих антенных систем для выделения сейсмических сигналов, несущих информацию о донных неоднородностях континентального шельфа [15–18]. Одновременно активизировались зарубежные исследователи, которые реализовали ряд комплексных проектов по изучению Арктики с привлечением научно-исследовательских судов различных классов. Под контролем международных научно-прикладных консорциумов были развёрнуты системы наблюдений на основе заякоренных измерителей, автономных подводных аппаратов и гидрофизических буёв, регулярно передающих данные наблюдений посредством спутниковой телеметрии [19].

К ответным действиям со стороны России логично отнести реализацию плана фундаментальных научных исследований и серию натурных экспериментов, проведённых совместными усилиями учёных Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), МГУ имени М.В. Ломоносова (Физфак), Центра молекулярной электроники Московского физико-технического института (МФТИ) и концерна “Морское подводное оружие – Гидроприбор” (“МПО – Гидроприбор”) на базе внештатной лаборатории последнего [20–23]. Полученные результаты подтвердили целесообразность разработки технических предложений с целью создания автономных модулей дрейфующей ледовой антенны [24], сочетающей гидроакустические и сейсмо-разведочные возможности экологически безопасной технологии поиска локальных неоднородностей [25].

Несмотря на известные преимущества пассивных технологий мониторинга (низкая стоимость, техническая простота, минимизация экологических проблем), способы их применения для решения ряда практически значимых задач всё ещё не получили исчерпывающего теоретического обоснования. По этой причине актуальны совершенствование научных основ существующих и разработка новых методов исследования слоистой структуры “морское дно – водный слой – ледовый покров” (с учётом главных положений “Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года”) в рамках комплексной задачи, связанной с необходимостью дальнейшего развития пассивных сейсмоакустических технологий и аппаратурных средств мониторинга акваторий в условиях ледовитости [18, 20].

Основы сейсмоакустической шумовой интерферометрии. Пассивные методы неразрушающей ди-

агностики, получившие в иностранной литературе название “шумовая интерферометрия” [26, 27], опираются на возможности оценки характеристик функции Грина из анализа функции взаимной корреляции шумовых полей в исследуемой области. Одно из основных ограничений – время накопления данных, требуемых для получения достоверных оценок искомых характеристик среды. Именно поэтому широкое применение находят пассивные сейсмотомаграфические методы, так как упругие свойства слоистой геологической среды практически не изменяются в течение периода накопления шумов в ходе эксперимента, который может длиться месяцы и даже годы [28, 29].

В задачах пассивной сейсмоакустической томографии также используются техники оценки времени распространения волнового возмущения между приёмниками путём анализа регистрируемых ими шумовых сигналов. Рассмотрим замкнутую колебательную систему, которая испытывает воздействие случайных источников шума. Производную по времени флуктуаций давления можно представить в виде суммы собственных мод $u_n(\mathbf{r})$ этой системы [29, 30]:

$$\dot{p}(\mathbf{r}, t) = \sum_n (a_n \sin \omega_n t + b_n \cos \omega_n t) u_n(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где a_n и b_n – случайные числа с нулевым средним. При этом предполагается, что источники шумов некоррелированы ($a_n b_m = 0$), скобки означают усреднение по множеству реализаций шума, а моды возбуждаются с одинаковой энергией $D: a_n a_m = b_n b_m = D \delta_{nm}$, где δ_{nm} – символ Кронекера. Функция Грина волнового поля для разнесённых в пространстве точек приёма \mathbf{r}_A и \mathbf{r}_B в модовом представлении записывается в виде:

$$G(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, t) = \sum_n u_n(\mathbf{r}_A) u_n(\mathbf{r}_B) \cos \omega_n t \cdot H(t), \quad (2)$$

где $H(t)$ – ступенчатая функция Хевисайда, равная 0 при $t < 0$ и 1 при $t \geq 0$; ω_n – циклическая частота моды с номером n . Рассмотрим усреднённую по времени наблюдения функцию взаимной корреляции шумовых полей:

$$K(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{p}(\mathbf{r}_A, t + \tau) \dot{p}(\mathbf{r}_B, t) dt, \quad (3)$$

где T определяет временной интервал интегрирования, по которому производится усреднение, а τ – временная задержка функции взаимной корреляции. Подставляя в уравнение (3) модовое разложение (1), можно получить:

$$\begin{aligned} K(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau) &= \sum_n D u_n(\mathbf{r}_A) u_n(\mathbf{r}_B) \frac{1}{T} \times \\ &\times \int_0^T \left\{ \cos[\omega_n(t + \tau)] \cos \omega_n t + \right. \\ &\left. + \sin[\omega_n(t + \tau)] \sin \omega_n t \right\} dt = \\ &= \sum_n D u_n(\mathbf{r}_A) u_n(\mathbf{r}_B) \cos \omega_n \tau. \end{aligned} \quad (4)$$

Сопоставляя выражения (2) и (4), получим взаимосвязь между функцией взаимной корреляции $K(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau)$ шумовых полей, зарегистрированных в пространственно разнесённых точках с координатами \mathbf{r}_A и \mathbf{r}_B , и запаздывающей $G(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, -\tau)$ и опережающей $G(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau)$ функциями Грина волнового уравнения для выбранной пары точек:

$$K(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau) = D[G(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau) + G(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, -\tau)], \quad (5)$$

при этом D – коэффициент, зависящий от поглощающих свойств волновода и характеристик источников [11].

По-видимому, впервые соотношения, аналогичные (5), были получены в квантовой теории поля [31, с. 97] для связи двухточечной корреляционной функции, усреднённой по основному состоянию поля (вакуумное среднее), и функции Грина этого поля, что и было затем “переоткрыто” в акустике [32].

Строго математически корреляционная функция шумов не позволяет определить ни абсолютное значение амплитуды функции Грина, ни её фазу, и несёт информацию лишь о мнимой части функции Грина с амплитудным коэффициентом, который является неизвестным во многих практических ситуациях. Несмотря на это, соотношение (5) широко используется для решения обратных задач. Дело в том, что в большинстве работ, посвящённых пассивной томографии параметров среды, в качестве исходных данных для решения обратной задачи рассматриваются времена распространения сигналов между точками регистрации шума, которые оцениваются

на основе частотно-временного анализа корреляционной функции шумов (или её производной). При этом оценки абсолютных значений амплитуды или фазы функции Грина не используются.

Проиллюстрируем типичный вид взаимокорреляционной функции на основе выполненного двумерного численного моделирования случайного шумового поля, принимаемого двумя разнесёнными на плоскости приёмниками. Среда распространения считалась однородной, со скоростью продольных волн $c_0 = 5$ км/с. На рисунке 1, *a* представлена одна из реализаций случайного распределения 1024 источников сигнала, расстояние между приёмниками составляло 4 км. Каждый источник излучал импульсный сигнал в виде модулированного гауссоидой синуса и действовал в отдельные интервалы времени. Регистрируемые на двух приёмниках сигналы с добавлением некоррелированной помехи использовались для расчёта взаимокорреляционной функции, которая в результате усреднялась по всем источникам. Результаты численного эксперимента показали (рис. 1, *б*), что функция имеет два максимума, симметричных относительно нулевой временной задержки. Положения максимумов соответствуют времени распространения волнового возмущения вдоль прямой, соединяющей приёмники (см. рис. 1, *a*). Это означает, что основной вклад в формирование информативных пиков итоговой усреднённой взаимокорреляционной функции вносят источники, расположенные вблизи этой прямой, поля же других источников формируют помеху.

Определённые ограничения на рассматриваемый подход накладывает неравномерное распределение

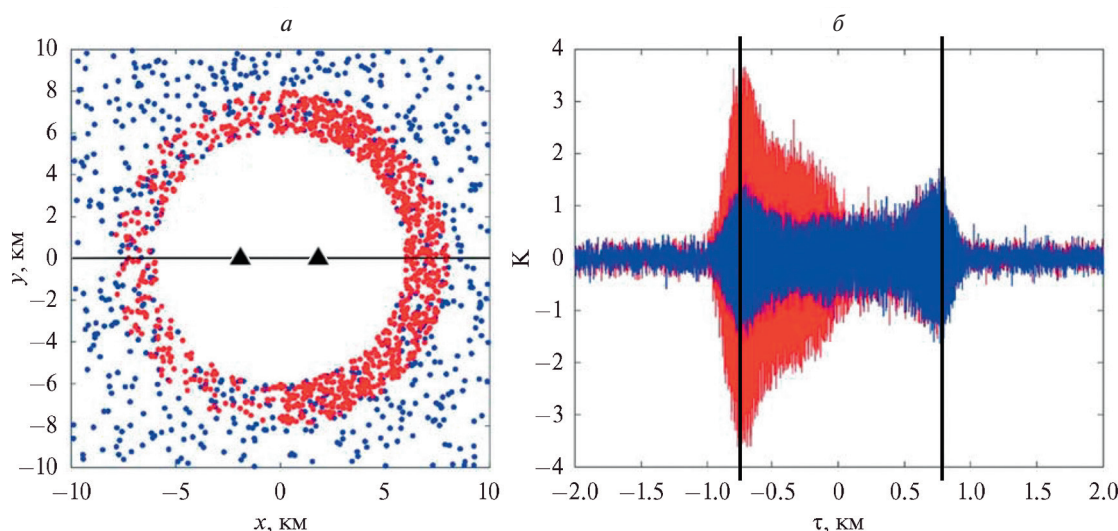


Рис. 1. Результаты численного моделирования случайного шумового поля, принимаемого двумя разнесёнными на плоскости приёмниками

a – пространственное распределение случайных шумовых источников (точки) относительно приёмников (треугольники); *б* – взаимокорреляционные функции двух разнесённых в пространстве приёмников, которые получены с учётом вклада различных групп источников, отмеченных соответствующим цветом; вертикальные чёрные линии соответствуют истинным временам распространения сигналов между приёмниками [18]

источников шума относительно пары приёмников в условиях реального эксперимента, что зачастую приводит к несимметричному виду корреляционной функции (см. рис. 1, б): один из её максимумов становится более слабым и может быть неразличим на фоне помехи. Для получения близкого к изотропному распределению шумовых источников важно и обоснование необходимого времени накопления шумового сигнала. В зависимости от расстояния между точками приёма, пространственной анизотропии шумового поля, а также технических характеристик приёмной системы время накопления может превышать несколько дней и даже недель, что делает невозможным применение пассивных методов для мониторинга быстро протекающих процессов в океане. При этом для оценки отдельных параметров волновода, например, приповерхностных характеристик дна, допускается использование шумовой интерферометрии, даже на фоне быстро меняющихся гидрологических условий [18].

В пассивном мониторинге важную роль играет возможность выделения из регистрируемого шумового поля отдельных мод с последующей их корреляционной обработкой [33]. Основное преимущество модовой корреляционной обработки по сравнению с корреляцией полных полей заключается в сокращении времени накопления шумов, которое требуется для достоверной оценки дисперсионных зависимостей отдельных мод. Дальнейшее сокращение времени накопления шумов связано с применением комбинированных приёмников, регистрирующих в одной точке пространства как скалярные, так и векторные характеристики геоакустических полей [33–35]. Работая в паре, такие приёмники позволяют выделить из всех шумов, приходящих с различных направлений, лишь те, которые распространяются преимущественно вдоль линии, соединяющей точки регистрации (см. рис. 1, а). Возможность совместного восстановления гидрологии, профиля течений и приповерхностных характеристик дна единой пассивной томографической схемой [11, 33] определяется тем, что дисперсионные зависимости мод различных номеров в достаточно широкой полосе частот по-разному искажаются при возмущениях искомым параметров. При этом для инверсии исходных данных используется линейное приближение, а уточнение получаемых оценок волновода происходит итерационно.

Следует отметить, что применяемые на практике алгоритмы решения задач акустической томографии в подавляющем большинстве являются приближёнными. Это накладывает ограничения на контроль состояния водного слоя, например, при взаимодействии между гидроакустическими модами. Кроме того, внутренние волны, влияние рельефа дна и ледового покрова в условиях арктического шельфа, наличие температурных контрастов в Северном Ледовитом океане требуют учёта неадиабатического характера распространения модовых сигналов [18].

Пассивные методы диагностики слоистых геофизических сред. Главное преимущество использования шумовой интерферометрии в сейсмологии заключается в существенно большей стабильности геологической среды по сравнению с гидросферой. Однако физическая основа у пассивных гидро- и сейсмоакустических методов одна и та же — возможность оценки характеристик функции Грина из шумовых корреляций. В океане этот подход позволяет оценить времена распространения гидроакустических мод (сравнительно высокие частоты), а в сейсмоакустических приложениях — характеристики поверхностных волн рэлеевского типа (низкие и сверхнизкие частоты).

Исходя из анализа сигналов от локализованных источников (местные землетрясения) и накопления случайного шумового фона, развиваемые в настоящее время пассивные сейсмоакустические методы можно разделить на две группы. К первой относятся локальная томография по временам прихода продольных и поперечных волн [36] и эмиссионная томография, базирующаяся на присутствии доминантных частот [37]. Методы второй группы работают с естественным микросейсмическим шумом, сформированным в основном поверхностными волнами рэлеевского типа. При этом для зондирования среды используется зависимость глубины проникновения волны от её длины. Таким образом, максимально возможная глубина исследования определяется не мощностью источника, а частотным составом регистрируемых микросейсм. Отдельно следует упомянуть метод низкочастотного микросейсмического зондирования [38, 39], суть которого заключается в определении пространственных вариаций амплитудного спектра естественных шумов. Метод достаточно прост в реализации и успешно применяется для изучения субвертикальных геологических неоднородностей земной коры.

Методы томографии и анализа микросейсмического шума объединяются в так называемом методе пассивной поверхностно-волновой томографии [40], который подразумевает анализ частотной зависимости скоростей, то есть дисперсионных кривых поверхностных волн, в различных пространственных областях. Данный метод наиболее обоснован с математической точки зрения и в настоящее время становится всё более популярным при изучении глубинного строения коры и верхней мантии нашей планеты.

Важное преимущество пассивной поверхностно-волновой томографии — упрощение решения обратной задачи, так как при использовании поверхностных волн, распространяющихся вдоль плоской границы, трёхмерная обратная задача решается на набор двумерных [41]. На первом этапе решается томографическая задача восстановления пространственного распределения скоростей поверхностных волн в горизонтальной плоскости для

различных частотных диапазонов (восстановление дисперсии поверхностных волн), затем для каждой точки в горизонтальной плоскости осуществляется обращение дисперсионных кривых для определения слоистой модели по глубине [42].

Накопленный в ИФЗ РАН опыт исследования разномасштабных разломно-блоковых структур земной коры, возможности применения методов пассивной сейсмотомографии с использованием донных сейсмостанций, а также упругих волн в ледяных пластинах [43] позволили в рамках единого подхода перейти к теоретическому и экспериментальному изучению волновых структур, распространяющихся в системе “литосфера – гидросфера – ледовый покров”. Важнейший этап создания экологически безопасных технологий пассивного сейсмогидроакустического мониторинга арктического шельфа – решение вопросов аппаратного обеспечения для одновременной регистрации различных типов волновых возмущений.

Вмораживаемый автономный геогидроакустический буй. Геогидроакустический ледовый буй (рис. 2) представляет собой модульную информационно-измерительную платформу в прочном водонепроницаемом корпусе, способном выдерживать давление до 30 атм., штатно комплектуемую сейсмо- и гидроакустическими приёмниками совместимых конструкций, а также многоканальным цифровым регистратором с интерфейсами удалённого управления и достаточным запасом автономности [24]. В зависимости от поставленных задач прибор допускает как самостоятельное, так и групповое применение при проведении геоакустических измерений на суше и в море, в том числе в составе многокомпонентных дрейфующих антенн ледового класса.

В качестве первичного преобразователя (1) штатно устанавливается однокомпонентный молекулярно-электронный велосиметр СМЕ-4211V, разработанный Центром молекулярной электроники МФТИ [44–47]. Источник питания (2) с номинальным напряжением 9–12.6 В состоит из набора стандартных литий-ионных элементов общей ёмкостью при комнатной температуре около 7000 мАч, а также платы согласования с регистратором серии NDAS-8224 (3), обладающим малым (менее 300 мВт) энергопотреблением при оцифровке сигналов с частотой 1, 10, 50, 100, 250, 500 и 1000 Гц. Блок интерфейсов для управления регистратором, дистанционной калибровки сейсмоприёмников и доступа к данным предполагает проводное (USB) и беспроводное (Wi-Fi) подключение, а общий объём внутренней памяти достигает 32 Гб. В этот блок также интегрирован приёмник GPS, обеспечивающий не только постоянную географическую привязку модуля, но и работу службы точного времени с возможностью включения записи по расписанию.

Лабораторно-стендовые испытания макетов подтвердили жизнеспособность предусмотренных конструкторских решений в построении основных составных частей вмораживаемых модулей и требуемых характеристик. Благодаря результатам научно-исследовательской работы на базе внештатной лаборатории концерна “МПО – Гидроприбор” и при участии Центра молекулярной электроники МФТИ была создана экспериментальная партия сейсмоакустических станций ледового класса, реализующих концепцию автономного режима работы. Сравнительные испытания рабочих макетов геогидроакустических буйев, проведённые на измерительных постах обсерватории Единой геофизической службы РАН, показали (см. рис. 2, б),

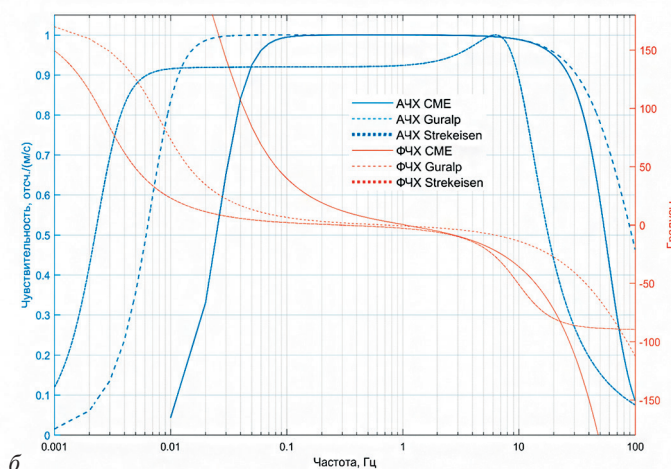
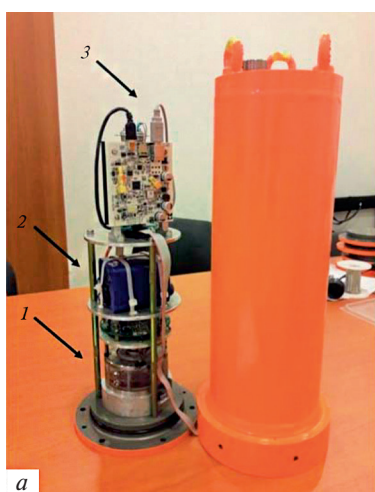


Рис. 2. Макет вмораживаемого геогидроакустического информационно-измерительного буя (а) и амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики молекулярно-электронных сейсмоприёмников (СМЕ-4211V) и эталонных маятниковых сейсмоприёмников Guralp (СМГ-3ESP) и Streckeisen (STS-1V/VBB) (б)

1 – первичный преобразователь; 2 – элементы питания; 3 – цифровой регистратор и блок электроники

что основные параметры отечественного прибора в рабочем диапазоне частот не уступают современным сейсмостанциям мирового уровня [24].

Следующий этап исследований возможностей и ограничений применения методов сейсмогидроакустического мониторинга волновых процессов в волноводах арктического типа – их теоретическое обоснование, а в тех случаях, когда строгого аналитического решения получить не удаётся, – проведение прямого численного моделирования.

Мониторинг арктического волновода в пассивном режиме. Теоретические основы описания волновых процессов в слоистой среде “литосфера – гидросфера – ледовый покров” изложены в работе [39] и базируются на общей теории распространения акустических волн в слоистых средах [44] в условиях мелкого моря [45]. Показано, что для модели покрытого льдом водоёма (изотропное твёрдое полупространство – слой однородной сжимаемой жидкости – изотропный упругий слой льда) удаётся получить аналитическое представление дисперсионного уравнения, описывающего распространение различных модовых составляющих полного сейсмогидроакустического поля [46]. Отметим наиболее информативные компоненты (полученные из уравнения определения компонент полного волнового поля) с точки зрения мониторинга среды в арктическом волноводе с помощью вмороженных в лёд сейсмоакустических приёмников (рис. 3, а):

- гидроакустические моды;
- фундаментальная мода – волна рэлеевского типа, распространяющаяся вдоль границы упругого слоистого полупространства и существующая на всех частотах; именно она рассматривается в качестве основного источника геоакустической информации о глубинном строении океанического дна (в отсутствие ледового покрова фундаментальной

моды соответствует волна Шолте, иногда называемая волной Стоунли, – донная поверхностная волна, не имеющая критической частоты и распространяющаяся вдоль границы “жидкий слой – упругое полупространство”);

- изгибная мода, фазовая скорость которой зависит от толщины льда.

Основным источником информации о донных структурах шельфа служит дисперсия скорости фундаментальной моды поверхностной волны, распространяющейся вдоль границы упругого полупространства со скоростью 1.5–4 км/с, которая определяется физическими свойствами донных слоёв. Поскольку глубина проникновения зондирующей волны в донные слои составляет около половины её длины, при решении ряда прикладных задач поиска полезных ископаемых наиболее привлекательным представляется частотный диапазон 0.1–1.7 Гц.

На арктическом шельфе помимо шумов океана необходимо учитывать и наведённые волновые процессы в слое льда. Существенный вклад в волновое поле, регистрируемое вмороженным сейсмоприёмником, вносят изгибно-гравитационные волны, скорость которых определяется решением дисперсионного уравнения [43]:

$$\left(\frac{\omega}{v}\right)^4 - \frac{\omega^2 \rho}{h^2 D} + \frac{\rho_0}{h^3 D} \left(g - \frac{i\omega v c_0}{\sqrt{v^2 - c_0^2}} \right) = 0, \quad (6)$$

где ω – частота; v – фазовая скорость; c_0 – скорость звука в воде; h – толщина ледового покрова; ρ, ρ_0 – плотность льда и воды соответственно; $D = E/[12(1-\nu^2)]$; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона ледяного покрова; g – ускорение свободного падения. На рисунке 3, б приведён пример чис-

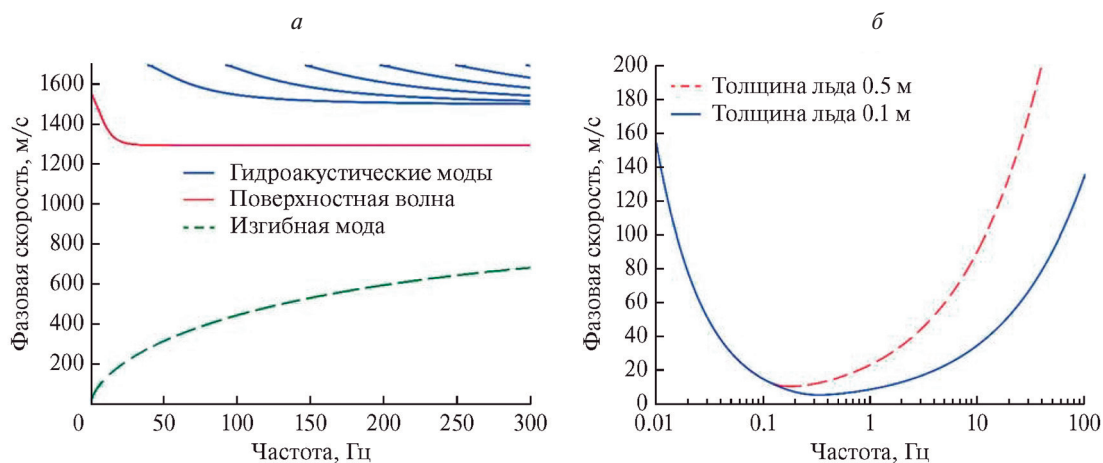


Рис. 3. Дисперсионные зависимости основных мод сейсмогидроакустического поля при глубине водоёма 30 м и толщине льда 1 м (а) и дисперсионные кривые изгибно-гравитационных волн для различных значений толщины льда (б) [18]

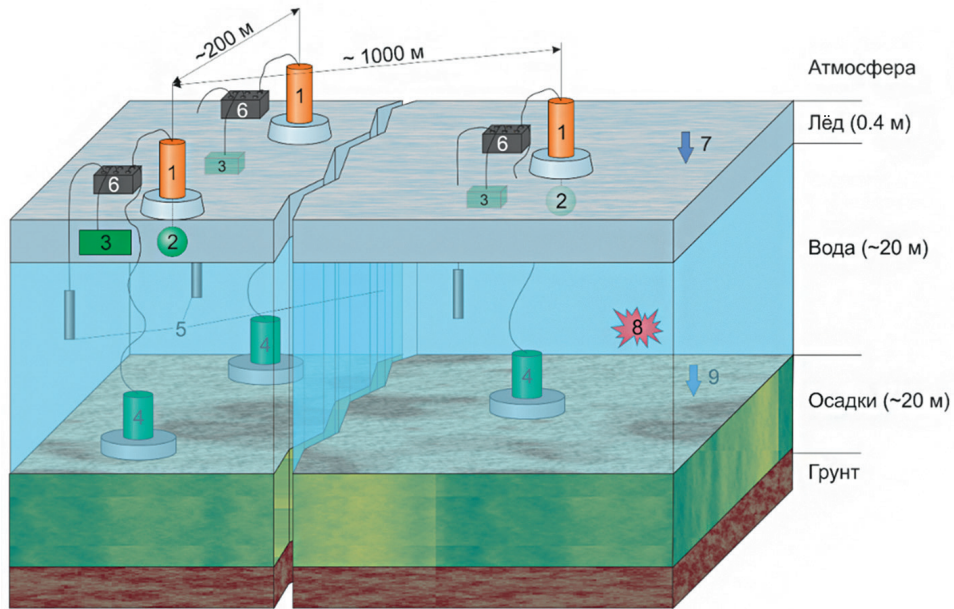


Рис. 4. Схема проведения экспериментов в ледовых условиях

1 – макет геогидроакустического буя; 2 – векторный пьезокерамический приёмник; 3 – маятниковый сейсмометр СМЗ-ОС; 4 – донный молекулярно-электронный сейсмоприёмник; 5 – гидрофон; 6 – цифровой регистратор; 7, 9 – импульсные воздействия на поверхности льда и на дне; 8 – импульсный источник в толще воды

ленного решения этого уравнения при характерных для арктического региона параметрах сред. Видно, что скорость изгибно-гравитационной волны на частотах выше 0.1 Гц обусловлена толщиной ледового покрова. При этом её скорость на порядок ниже скорости фундаментальной моды поверхностной волны в диапазоне частот, представляющем интерес для глубинного зондирования дна.

Спектрально-корреляционный анализ вертикальной компоненты колебательной скорости сейсмоакустического шума, регистрируемой вмороженными приёмниками в двух удалённых точках, теоретически даёт оценку дисперсии групповой скорости изгибно-гравитационной моды ледового покрова, что позволяет восстановить средние значения параметров льда (толщина h , плотность ρ ,

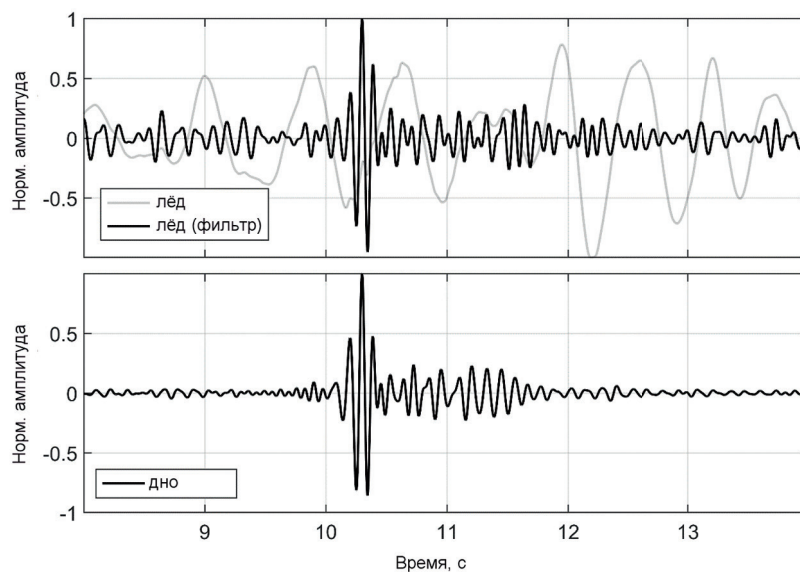


Рис. 5. Пример синхронной записи сигнала от импульсного источника сейсмометрами на дне (внизу) и на поверхности льда (вверху)

модуль Юнга E и коэффициент Пуассона μ) между точками наблюдения [21].

Естественным продолжением наших работ стали натурные эксперименты на льду Ладожского озера [21, 46], результаты которых подтвердили возможность томографической реконструкции параметров слоистой геофизической среды “упругое полупространство – водный слой – ледовый покров” по данным о модовой структуре регистрируемого сейсмогидроакустического поля. Несмотря на высокий уровень естественных шумов, в экспериментах на Ладожском озере (рис. 4) и на Байкале была продемонстрирована возможность выбора частотного диапазона для оценки параметров фундаментальной моды поверхностной волны по измерениям на льду (рис. 5). Таким образом, в условиях мелкого, покрытого льдом моря донные микросейсмические сигналы могут использоваться в качестве зондирующих сигналов для пассивного мониторинга арктического волновода [18, 23, 24]. Сформированный научный задел [38–40] может стимулировать развитие инновационных подходов при совершенствовании технологий разведки месторождений углеводородного сырья на основе данных аппаратных комплексов, осуществляющих мониторинг по шумам неоднородностей морского дна.

* * *

В настоящее время в области разработки геоакустических технологий для фундаментальных и прикладных исследований в Арктике основное внимание уделяется вопросам развития автономных систем наблюдений (в том числе роботизированных), способных осуществлять долговременный мониторинг заданных районов. Полученные данные могут использоваться при построении прогностических моделей, например, для наложения априорных ограничений на результаты численных экспериментов. Обзор достижений отечественных и зарубежных научных коллективов свидетельствует в пользу создания новой, экологически безопасной технологии мониторинга Северного Ледовитого океана. Она включает разведку и доразведку месторождений полезных ископаемых на арктическом шельфе и предполагает накопление и анализ естественных микросейсмических шумов.

Результаты фундаментальных научных исследований взаимосвязанных волновых процессов в системе “литосфера – гидросфера – ледовый покров”, а также лабораторных и натурных экспериментов, выполненных сотрудниками внештатной лаборатории концерна “МПО – Гидроприбор”, были положены в основу концепции отечественной технологии пассивной сейсморазведки на арктическом шельфе. Дальнейшая формулировка технических предложений по структуре, составу и конструктивной компоновке вмораживаемых и донных сейсмостанций позволила перейти к созданию семейства

автономных геоакустических буёв на базе модульной информационно-измерительной платформы. В ходе лабораторно-стендовых, полунатурных и натурных испытаний установлено, что технические возможности рабочих макетов по ключевым показателям не уступают зарубежным аналогам.

Перспективы развития технологий комплексного мониторинга северных акваторий, по всей видимости, связаны с созданием единой системы наблюдений, главными элементами которой станут вмораживаемые дрейфующие антенны ледового класса и автономные подводные аппараты, объединённые акустическими и иными каналами связи в общее информационное пространство [18]. Таким образом, основой повышения эффективности дальнейших исследований в рамках рассмотренного научного направления призваны стать новые научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки в области теоретического и экспериментального изучения всей совокупности сейсмогидроакустических волновых процессов в Арктике. Это обеспечит российское научное присутствие в стратегически важном регионе планеты, будет способствовать подъёму отечественного приборостроения в интересах освоения месторождений полезных ископаемых на континентальном шельфе и развития Северного морского пути.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавёров Н.П., Рослов Ю.В., Лобковский Л.И. и др. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4 (4). С. 4–13.
Laverov N.P., Roslov Y.V., Lobkovsky et al. Prospects of Sea-Floor Seismography in the Russian Federation // The Arctic: ecology and economy. 2011, no. 4, pp. 4–13.
2. Дынкин А.А. Международное сотрудничество в Арктике: риски и возможности // Вестник РАН. 2015. № 5–6. С. 404–412.
Dynkin A.A. International Cooperation in the Arctic: Risks and Opportunities // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2015, no. 3, pp. 198–205.
3. Лавёров Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В. и др. Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и примыкающих территорий для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 3–35.
Laverov N.P., Lobkovsky L.I., Kononov M.V. et al. A Geodynamic Model of the Evolution of the Arctic Basin and Adjacent Territories in the Mesozoic and Cenozoic and the Outer Limit of the Russian Continental Shelf // Geotectonics. 2013, no. 1, pp. 1–30.
4. Артюшков Е.В., Чехович П.А. Хребет Ломоносова и Восточно-Арктический шельф – части единой

- литосферной плиты. Опыт сравнительного анализа строения сдвиговых зон // Доклады Академии наук. 2017. № 2. С. 196–200.
- Artyushkov E.V., Chekhovich P.A.* Lomonosov ridge and the Eastern Arctic Shelf as elements of an integrated lithospheric plate: Comparative analysis of wrench faults // *Doklady Earth Sciences*. 2017, no. 1, pp. 485–489.
5. *Лавёров Н.П., Богоявленский В.И., Богоявленский И.В.* Фундаментальные аспекты рационального освоения ресурсов нефти и газа Арктики и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы // Арктика: экология и экономика. 2016. № 2. С. 4–13.
- Laverov N.P., Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V.* Fundamental aspects of the rational development of oil and gas resources of the Arctic and Russian shelf: strategy, prospects and challenges // *The Arctic: ecology and economy*. 2016, no. 2, pp. 4–13.
6. *Конторович А.Э.* Пути освоения ресурсов нефти и газа российского сектора Арктики // Вестник РАН. 2015. № 5–6. С. 420–431.
- Kontorovich A.E.* Ways of Developing Oil and Gas Resources in the Russian Sector of the Arctic // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2015, no. 3, pp. 213–222.
7. Морская сейсморазведка / Под ред. А.Н. Телегина. М.: Геоинформмарк, 2004.
- Marine seismic exploration / Ed. by A.N. Telegin, Moscow: Geoinformmark, 2004. (In Russ.)*
8. *Литвак А.Г.* Акустика глубоководной части Северного Ледовитого океана и Арктического шельфа России // Вестник РАН. 2015. № 5–6. С. 449–463.
- Litvak A.G.* Acoustics of the Deepwater Part of the Arctic Ocean and of Russia's Arctic Shelf // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2015, no. 3, pp. 239–250.
9. *Mordret A., Landès M., Shapiro N.M. et al.* Ambient noise surface wave tomography to determine the shallow shear velocity structure at Valhall: depth inversion with a Neighbourhood Algorithm // *Geophys. J. Int.* 2014, vol. 198, pp. 1514–1525.
10. *Яновская Т.Б., Лыскова Е.Л., Королёва Т.Ю.* Радиальная анизотропия верхней мантии Европы по данным поверхностных волн // Физика Земли. 2019. № 2. С. 3–14.
- Yanovskaya T.B., Lyskova E.L., Koroleva T.Yu.* Radial Anisotropy in the European Upper Mantle from Surface Waves // *Physics of the Earth*. 2019, no. 2, pp. 3–14.
11. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* Использование в пассивной томографии океана низкочастотных шумов // Акустический журнал. 2008. № 1. С. 51–61.
- Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S.* The use of low-frequency noise in passive tomography of the ocean // *Acoustical Physics*. 2008, no. 1, pp. 42–51.
12. *Godin O.A., Zabotin N.A., Goncharov V.V.* Ocean tomography with acoustic daylight // *Geophys. Res. Lett.* 2010, vol. 37, L13605.
13. *Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т., Петров Ю.С. и др.* Разработка физических основ низкочастотной акустической томографии на арктическом шельфе волоконно-оптическими сейсмоприёмниками // Известия РАН. Серия физическая. 2018. № 5. С. 556–559.
- Kulchin Y.N., Kamenev O.T., Petrov Y.S. et al.* Developing Physical Bases for Low-Frequency Acoustic Tomography in the Arctic Shelf Using Fiberoptic Geophones // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018, no. 5, pp. 487–490.
14. *Johansen T.A., Ruud B.O., Tømmerbakke R., Jensen K.* Seismic on floating ice: data acquisition versus flexural wave noise // *Geophysical Prospecting*. 2019, vol. 67, pp. 532–549.
15. *Serripietri A., Moreau L., Boue P. et al.* Recovering and monitoring the thickness, density, and elastic properties of sea ice from seismic noise recorded in Svalbard // *The Cryosphere*. 2022, vol. 16, pp. 2527–2543.
16. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С.* О локализации геологических особенностей арктического шельфа на основе анализа модовой структуры сейсмоакустических полей // Доклады Академии наук. 2018. № 1. С. 80–83.
- Sobisevich A.L., Presnov D.A., Sobisevich L.E., Shurup A.S.* Localization of Geological Inhomogeneities on the Arctic Shelf by Analysis of the Seismoacoustic Wave Field Mode Structure // *Doklady Earth Sciences*. 2018, vol. 479 (1), pp. 355–357.
17. *Krylov A.A., Novikov M.A., Kovachev S.A. et al.* Features of Seismological Observations in the Arctic Seas // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, vol. 11, 2221.
18. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Шуруп А.С.* Фундаментальные основы совершенствования пассивных сейсмогидроакустических методов исследования шельфа Арктики // Акустический журнал. 2021. № 1. С. 72–97.
- Sobisevich A.L., Presnov D.A., Shurup A.S.* Fundamentals of Passive Seismohydroacoustic Methods for Arctic Shelf Investigation // *Acoustical Physics*. 2021, no. 1, pp. 62–82.
19. *Mikhalevsky P.N., Sagen H., Worcester P.F. et al.* Multipurpose acoustic networks in the integrated Arctic Ocean observing system // *Arctic*. 2015, vol. 68, pp. 11–27.
20. *Дмитриченко В.П.* Гидроакустические антенны подводных аппаратов. СПб.: АО «Концерн “МПО – Гидроприбор”», 2024.
- Dmitrichenko V.P.* Hydroacoustic antennas of underwater vehicles. St. Petersburg: JSC «Concern “MPO – Gidropribor”», 2024. (In Russ.)
21. *Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С.* Определение параметров ледового покрова с помощью

- сейсмоакустического шума // *Акустический журнал*. 2023. № 5. С. 637–651.
- Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S.* Determination of ice cover parameters using seismoacoustic noise // *Acoustical Physics*. 2023, no. 5, pp. 752–737.
22. *Тихоцкий С.А., Преснов Д.А., Собиसेвич А.Л., Шуруп А.С.* Использование низкочастотных шумов в пассивной сейсмоакустической томографии дна океана // *Акустический журнал*. 2021. № 1. С. 107–116.
- Tikhotskii S.A., Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S.* The Use of Low-Frequency Noise in Passive Seismoacoustic Tomography of the Ocean Floor // *Acoustical Physics*. 2021, no. 1, pp. 91–99.
23. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Тубанов Ц.А. и др.* Байкальский сейсмоакустический эксперимент // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021. № 1. С. 82–86.
- Sobisevich A.L., Presnov D.A., Tubanov T.A.* The Baikal Ice-Based Seismoacoustic Experiment // *Doklady Earth Sciences*. 2021, no. 1, pp. 76–79.
24. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Агафонов В.М., Собисевич Л.Е.* Вмораживаемый автономный геоакустический буй нового поколения // *Наука и технологические разработки*. 2018. № 1. С. 25–34.
- Sobisevich A.L., Presnov D.A., Agafonov V.M., Sobisevich L.E.* New-Generation Autonomous Geohydroacoustic Ice Buoy // *Seismic Instruments*. 2018, no. 6, pp. 677–681.
25. *Дмитриченко В.П., Преснов Д.А., Руденко О.В. и др.* Патент на изобретение № RU2646528 “Способ поиска полезных ископаемых на шельфе морей, покрытых льдом”. Дата приоритета 07.12.2016 г., опубликовано 05.03.2018 г., бюлл. № 7.
- Dmitrichenko V.P., Presnov D.A., Rudenko O.V. et al.* Patent for invention no. RU2646528 “Method for searching for minerals on the shelf of seas covered with ice”. Priority date 07.12.2016, published 05.03.2018, bul. no. 7. (In Russ.)
26. *Curtis A., Gerstoft P., Sato H. et al.* Seismic interferometry –Turning noise into signal // *The Leading Edge*. 2006, vol. 25, pp. 1082–1092.
27. *Godin O.A.* Acoustic noise interferometry in a time-dependent coastal ocean // *J. Acoust. Soc. Am.* 2018, vol. 143, pp. 595–604.
28. *Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.* High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise // *Science*. 2005, vol. 307 (5715), pp. 1615–1618.
29. *Snieder R., Wapenaar K.* Imaging with ambient noise // *Physics Today*. 2010, vol. 63, pp. 44–49.
30. *Weaver R.L., Lobkis O.I.* Ultrasonics without a source: Thermal fluctuation correlations at MHz frequencies // *Phys. Rev. Lett.* 2001, vol. 87, 134301.
31. *Пескин М., Шредер Д.* Введение в квантовую теорию поля. Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001.
- Peskin M., Schroeder D.* Introduction to quantum field theory. Izhevsk: SIC “Regular and chaotic dynamics”, 2001. (In Russ.)
32. *Weaver R.L., Lobkis O.I.* Ultrasonics without a source: Thermal fluctuation correlations at MHz frequencies // *Phys. Rev. Lett.* 2001, vol. 87, 134301.
33. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* Использование коротких искривлённых вертикальных антенн в акустической томографии океана // *Акустический журнал*. 2009. № 2. С. 232–246.
- Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S.* Using short curved vertical arrays in ocean acoustic tomography // *Acoustical Physics*. 2009, vol. 55, pp. 240–252.
34. *Гордиенко В.А., Ильичёв В.И., Захаров Л.Н.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989.
- Gordienko V.A., Plyichev V.I., Zakharov L.N.* Vector-phase methods in acoustics. Moscow: Nauka, 1989. (In Russ.)
35. *Сергеев С.Н., Шуруп А.С., Годин О.А. и др.* Выделение акустических мод во Флоридском проливе методом шумовой интерферометрии // *Акустический журнал*. 2017. № 1. С. 73–83.
- Sergeev S.N., Shurup A.S., Godin O.A. et al.* Separation of acoustic modes in the Florida Straits using noise interferometry // *Acoustical Physics*. 2017, no. 1, pp. 76–85.
36. *Кулаков И.Ю.* Взгляд на процессы под вулканами через призму сейсмической томографии // *Вестник РАН*. 2013. № 8. С. 698–698.
- Koulakov I.Yu.* A View on Processes beneath Volcanoes through the Prism of Seismic Tomography // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2013, no. 4, pp. 345–356.
37. *Чеботарёва И.Я.* Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // *Акустический журнал*. 2011. Т. 57. С. 844–853.
- Chebotareva I.Ya.* Methods for passive study of the geological environment using seismic noise // *Acoustical Physics*, no. 6, pp. 857–865.
38. *Горбатиков А.В.* Патент на изобретение № RU2271554 “Способ сейсморазведки”, дата приоритета 25.03.2005 г., бюлл. № 7.
- Gorbatikov A.V.* Patent for invention no. RU2271554 “Method of seismic exploration”, priority date 03.25.2005, bul. no. 7. (In Russ.)
39. *Собисевич А.Л., Разин А.В.* Геоакустика слоистых сред. М: ИФЗ РАН, 2012.
- Sobisevich A.L., Razin A.V.* Geoacoustics of layered media. Moscow: Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, 2012. (In Russ.)

40. Яновская Т.Б. Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб.: Наука, 2015.
Yanovskaya T.B. Surface wave tomography in seismological studies. St. Petersburg: Nauka, 2015. (In Russ.)
41. Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S. Model of the geoacoustic tomography based on surface-type waves // *Physics of Wave Phenomena*. 2016, vol. 24, pp. 249–254.
42. Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P. et al. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // *Geophys. J. Int.* 2007, vol. 169, pp. 1239–1260.
43. Marsan D., Weiss J., Larose E., Metaxian J.-P. Sea-ice thickness measurement based on the dispersion of ice swell // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011, vol. 131, pp. 80–91.
44. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
Brekhovskikh L.M. Waves in layered media. Moscow: Nauka, 1973. (In Russ.)
45. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997.
Katsnelson B.G., Petnikov V.G. Acoustics of the shallow sea. Moscow: Nauka, 1997. (In Russ.)
46. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // *Акустический журнал*. 2014. № 4. С. 426–436.
Presnov D.A., Zhostkov R.A., Gusev V.A., Shurup A.S. Dispersion dependences of elastic waves in an ice-covered shallow sea // *Acoustical Physics*. 2014, no. 4, pp. 455–465.
47. Агафонов В.М., Егоров И.В., Шабалина А.С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью // *Сейсмические приборы*. 2013. № 1. С. 5–18.
Agafonov V.M., Egorov I.V., Shabalina A.S. Operating principles and technical characteristics of a small-sized molecular-electronic seismic sensor with negative feedback // *Seismic Instruments*. 2014, vol. 50, pp. 1–8.

SEISMOACOUSTICS IN ARCTIC SEAS: FUNDAMENTAL PRINCIPLES FOR IMPROVING MONITORING TECHNOLOGIES

A.L. Sobisevich^{a,*}, V.P. Dmitrichenko^{b,**}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*JSC Concern “Sea Underwater Weapon Gidropribor”, St. Petersburg, Russia*

*E-mail: sobisevich@yandex.ru

**E-mail: dmitrichenko-v@yandex.ru

The results of the development of scientific foundation of technology for passive geohydroacoustic monitoring of Arctic seas are presented, including theoretical studies of the conditions for the origin and propagation of wave fields generated by induced geodynamic processes in the layered structure “lithosphere – hydrosphere – ice cover”, the solution of a separate class of problems within the framework of a fundamental scientific problem, related to the search for innovative, environmentally safe geophysical technologies to outline the local heterogeneities, as well as the creation of prototypes, laboratory and full-scale testing of prototypes of new generation ice-based geohydroacoustic buoys. The method for estimating parameters of floating ice (thickness, density, Young’s modulus, Poisson’s ratio) in passive mode was proposed and tested in a field experiment. Particular attention is paid to the state of scientific and practical groundwork regarding the possibilities of developing methods for passive geohydroacoustic monitoring of the Arctic seas.

Keywords: layered geophysical medium, Russian Arctic, Arctic shelf, geohydroacoustic wave fields, surface waves, ice cover, flexural gravity waves, seismohydroacoustic drifting ice-based antennas, passive seismic tomography, monitoring of local heterogeneities, geoecology.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К СОКРАЩЕНИЮ УЩЕРБА ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2024 г. П.Н. Шебалин^{a,*}

^aИнститут теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

*E-mail: shebalin@mitp.ru

Поступила в редакцию 26.05.2024 г.

После доработки 15.07.2024 г.

Принята к публикации 21.07.2024 г.

Катастрофическое землетрясение 6 февраля 2023 г. в Турции напомнило всему миру, включая Россию, о необходимости совершенствовать систему снижения сейсмической опасности. В нашей стране большие надежды возлагаются на сейсмостойкое строительство, опирающееся на отечественные карты общего сейсмического районирования (ОСР). Действующие карты основаны на вероятностном анализе сейсмической опасности и за 25 лет в целом себя оправдали. Допущенные ошибки (недооценка опасности в местах нескольких сильных землетрясений, завышение риска на обширных территориях) были неизбежны ввиду скудности данных, которые имелись на момент создания карт.

В статье анализируются наиболее вероятные причины ошибок в картах ОСР и пути их преодоления, обосновывается внедрение риск-ориентированного подхода с целью снижения совокупного экономического ущерба от землетрясений, включая нерациональные затраты на антисейсмическое усиление конструкций. Кроме того, приведён анализ вероятностного и детерминистского подходов к оценке сейсмической опасности.

Ключевые слова: слоистая геофизическая среда, Арктическая зона РФ, арктический шельф, геогидроакустические поля, поверхностные волны, ледовый покров, изгибно-гравитационные волны, сейсмогидроакустические дрейфующие ледовые антенны, пассивные сейсмотомографические методы, мониторинг локальных неоднородностей, геоэкология.

DOI: 10.31857/S0869587324080058, EDN: FDAHFF

Землетрясения — одни из самых смертоносных природных катастроф. Поэтому задачей стран, находящихся в зоне риска, становится уменьшение их последствий. Из 10 катаклизмов, повлёкших наибольшее число жертв в 1950–2023 гг., половина пришлась на землетрясения, а по суммарному урону за тот же период они заняли третье место после наводнений и тропических циклонов [1]. Ущерб

может быть значительно сокращён путём введения превентивных защитных мер.

Основной способ противостоять землетрясениям — усиление конструкций зданий и сооружений, благодаря чему они не разрушаются, а возможные повреждения минимизируются. Такие меры принимаются исходя из оценок сейсмической опасности и дифференцируются по ожидаемому уровню сейсмических воздействий. Точно предсказать их масштаб очень сложно. Обычно предполагается, что землетрясения происходят на уже сформировавшихся активных тектонических разломах, размер которых обуславливает максимальную магнитуду. Однако нередко сильные землетрясения случаются в нетипичных местах, поэтому у учёных может возникнуть соблазн зависеть риски. Защита зданий и сооружений требует значительных дополнительных вложений на этапе строительства. Чем точнее оценки сейсмической опасности, тем меньше совокупный ущерб, включая непредвиденные финансовые издержки. К сожалению, опыт применения методов оценки последствий землетрясений,



ШЕБАЛИН Пётр Николаевич — член-корреспондент РАН, директор ИТПЗ РАН.

разработанных в конце XX в., показал, что наиболее разрушительные события часто происходили там, где максимальный ожидаемый порог был меньше [2], при этом на больших территориях опасность преувеличивалась [3].

Чтобы оправдать дополнительные затраты на сейсмостойкое строительство нужно выяснить возможный ущерб от землетрясений. Основой для расчётов стал вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО, в англоязычной терминологии – Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA [4]). Страховые компании используют оценки сейсмического риска для определения соответствующих страховых тарифов и перестрахования (передача части ответственности от одной страховой компании другой), а местные органы власти и крупные корпорации – для оптимального распределения средств на усиление конструкций и другие меры снижения рисков. Система страхования позволяет аккумулировать целевые денежные фонды, чтобы использовать их для возмещения потерь, обусловленных землетрясениями, а также гибко оперировать строительными нормами. В 1990-е годы для проведения ВАСО была запущена международная программа GSHAP (The Global Seismic Hazard Assessment Program) [5]. В России этот подход был впервые применён при составлении комплекта карт общего сейсмического районирования ОСР-97 [6], однако главная цель ВАСО (экономические расчёты рисков ущерба от землетрясений и включение страховых и перестраховочных компаний в общую систему снижения сейсмической опасности) до сих пор не реализована.

Важную роль в снижении сейсмической опасности играет прогноз землетрясений, обычно подразумевающий предсказание времени их возникновения, места и силы. Во второй половине XX в., в связи с быстрым развитием сейсмических сетей и увеличением наблюдательной базы в других областях геофизики, учёные ожидали стремительного прогресса и в прогнозировании [7–9]. Однако отсутствие научных прорывов в этой сфере привело к появлению теорий, согласно которым точные прогнозы землетрясений сложны или вовсе невозможны [10–13]. Это повлекло за собой почти полное прекращение финансирования прогнозных работ, в частности в Японии и США. Тем не менее длительная проверка среднесрочных прогнозов, например по алгоритму М8 (используется для предсказания мощных землетрясений магнитудой 7.5 и выше) [14], доказала их высокую статистическую значимость и оправданность. Например, в Италии и России (Камчатка) стали внедрять оперативный прогноз землетрясений, и эта информация направлялась местным властям [15, 16]. Чтобы ошибочно не приписывать успех прогнозам, оказавшимся на деле лишь случайными, необходимы количественные методы оценки их результатов. Кроме того, эти методы позволяют установить точность прогнозов с целью их адекватной интерпретации, в частности, для уточнения

общего сейсмического районирования для относительно коротких временных интервалов.

Создание систем раннего предупреждения – относительно новое направление в сфере сокращения ущерба от землетрясений. Системы построены на следующем принципе: продольная сейсмическая волна распространяется быстрее разрушительной поперечной волны, что позволяет в полностью автоматическом режиме, определив положение и силу источника волн, послать сигнал для оповещения населения и отключения электропитания от установок, которые могут подвергнуться особой опасности [17]. Такие системы активно развиваются во многих странах, включая США, Японию и Китай, чему также способствует краудсорсинг с использованием обычных смартфонов [18]. Смартфоны могут служить детекторами сейсмических волн, так как имеют встроенный акселерометр, а сети сотовой связи обеспечивают мгновенную передачу сигнала о пришедшей волне.

Не стоит забывать о планировании действий властей и обучении населения на случай возникновения чрезвычайной ситуации. Опыт ликвидации последствий многих разрушительных землетрясений показал, что эти меры помогают сократить ущерб от стихийного бедствия.

Оценка сейсмической опасности. В мировой практике уменьшение ущерба от землетрясений в основном сводится к применению в сейсмоопасных регионах специальных строительных технологий и сейсмоусиления, обеспечивающих большую устойчивость зданий. Степень сейсмических воздействий традиционно измеряется в баллах шкалы макросейсмической интенсивности (наиболее распространённые – МСК-64 и Mercalli) или в значениях пикового ускорения грунта (Peak Ground Acceleration, PGA). Максимально возможные показатели зависят от географического положения объекта и локальных условий, главное из которых – тип подстилающих грунтов. Зная ожидаемое максимальное воздействие, прибегают к разным уровням сейсмоусиления. Оценка сейсмической опасности включает определение ожидаемой степени сейсмических воздействий и производится в зависимости от географического положения для средних грунтов¹, наиболее распространённых в зонах строительства. Результаты представляют в виде карт сейсмического районирования, на которых выделяют зоны ожидаемого максимального сейсмического воздействия определённой степени, например одной и той же балльности.

Существует два подхода к оценке сейсмической опасности:

- *детерминистский анализ сейсмической опасности* (ДАСО) отвечает на вопрос, каково мак-

¹ По плотности и твёрдости грунт подразделяется на слабый (песок, рыхлая земля), средний (растительная земля) и твёрдый (глина, каменистые породы).

симально возможное воздействие от землетрясения в данной точке;

- *вероятностный анализ сейсмической опасности* (ВАСО) — с какой вероятностью в данной точке возможны воздействия заданной степени; в данном случае строится несколько карт с расчётами ожидаемого максимального воздействия в разные интервалы времени (например, 500, 5000, 10000 лет), что считается эквивалентным вероятности 0.1 превышения соответствующего уровня воздействия за 50, 500 и 1000 лет.

Оба подхода содержат две практически независимые составляющие. Первая — определение зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) — устанавливает, где, с какой силой и с какой частотой (в ВАСО) происходят землетрясения. Вторая заключается в построении модели воздействия землетрясений, включая затухание сейсмической волны на пути от очага до объекта. Несмотря на кажущуюся сложность, наибольший прогресс в мировой науке достигнут именно во втором случае.

Сейсмоусиление зданий и сооружений конкретного типа, в зависимости от ожидаемой степени воздействия, обычно обусловлено строительными нормами и правилами. Во многих странах этот директивный подход дополняется (а иногда заменяется) риск-ориентированным подходом, то есть более мягким стимулированием к внедрению мер сейсмоусиления с помощью системы страхования от стихийных бедствий. Очевидно, что затраты на сейсмоусиление на этапе строительства не должны превышать совокупный потенциальный ущерб для зданий без сейсмоусиления за период их эксплуатации. В противном случае эти финансовые издержки также могут рассматриваться как ущерб. Вероятностный подход был разработан именно с целью оптимизации расходов на сейсмостойкое строительство.

В России первая карта общего сейсмического районирования (ОСР) была создана в 1937 г. и впоследствии обновлялась в 1949, 1957, 1968 гг. Все карты базировались на детерминистском принципе. В 1978 г. была предпринята попытка учесть повторяемость сейсмических событий на основе каталога сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён [19]. В связи с тем, что срок эксплуатации и степень ответственности объектов отличаются, были выбраны интервалы в 100, 1000 и 10000 лет. Например, период эксплуатации жилых зданий обычно составляет не более 100 лет, а для объектов атомной энергетики или опасных химических предприятий повторяемость разрушительных землетрясений даже один раз в 1000 лет недопустима.

Карты ОСР-97 [6] строились на принципах ВАСО в рамках программы GSHAP. Они долгое время использовались в качестве нормативных при строительстве в сейсмоопасных регионах. Карты ОСР-2015 и ОСР-2016, составленные по той же

методике и также причисленные к нормативным, в значительной степени повторяют ОСР-97 и, по сути, лишь дополнены сильными землетрясениями, которые были пропущены в первом варианте. Для небольших территорий ожидаемая балльность снижалась, однако средняя сейсмическая опасность увеличивалась.

Недостатки карт ОСР и их вероятные причины.

В последние годы карты ОСР часто подвергались критике [20], главным образом из-за субъективности многих оценок, на которых базируются результирующие карты [21]. В работе [3] отмечается, что карты ОСР, помимо пропусков сильных землетрясений, фактически завышают сейсмическую опасность на очень больших территориях. Авторами также проведена оценка суммарных площадей теоретических изосейст [19] (линии равной макросейсмической интенсивности) от всех землетрясений магнитудой 3.5 и выше на территории России и в приграничных районах за 1997–2022 гг., то есть за 25 лет после создания карт ОСР-97. В интегральном виде эти результаты представлены на рисунке 1.

Для удобства сравнения площадь теоретических изосейст от реальных землетрясений умножена на 20. Карта ОСР-97-А отвечает вероятности 0.1 превышения соответствующей интенсивности за 50 лет, поэтому площади теоретических изосейст, умноженные на 20, должны были почти совпасть. То, что они оказались как минимум в 4 раза меньше, говорит о примерно четырёхкратном завышении сейсмической опасности на карте ОСР-97. Площади на карте ОСР-2016-А лишь немногим меньше. Получается, что более поздняя карта не исправляет погрешность. При этом опасность на карте ОСР-97-А была занижена для четырёх сильнейших землетрясений 1997–2022 гг. (за исключением землетрясения Тихоокеанского сейсмического пояса с очагами на стыке литосферных плит): Чуйское на Алтае в 2003 г., $M=7.3$ (10 баллов в эпицентре против 9 баллов, ожидаемых в соответствии с картой ОСР-97-А), Олюторское на севере Камчатки в 2006 г., $M=7.6$ (9–10 против 8 баллов, ожидаемых в эпицентре), Тувинское в 2012 г., $M=7.3$ (9 баллов против 8) и Илин-Тасское на севере Якутии в 2013 г., $M=6.7$ (8–9 баллов против 7). Эти ошибки отнюдь не умаляют той огромной роли, которую сыграли карты ОСР-97 и их последующие модификации в снижении сейсмической опасности в России, а лишь отражают уровень развития науки, количество и качество накопленных на тот момент данных.

Попробуем разобраться, в чём главные причины ошибок. Поскольку в расчётах теоретической интенсивности применялись те же уравнения макросейсмического поля по Н.В. Шебалину [19], что и при составлении карт ОСР-97, достаточно рассмотреть использованную в ОСР-97 линеаментно-доменно-фокальную (ЛДФ) модель [6] зон ВОЗ, ко-

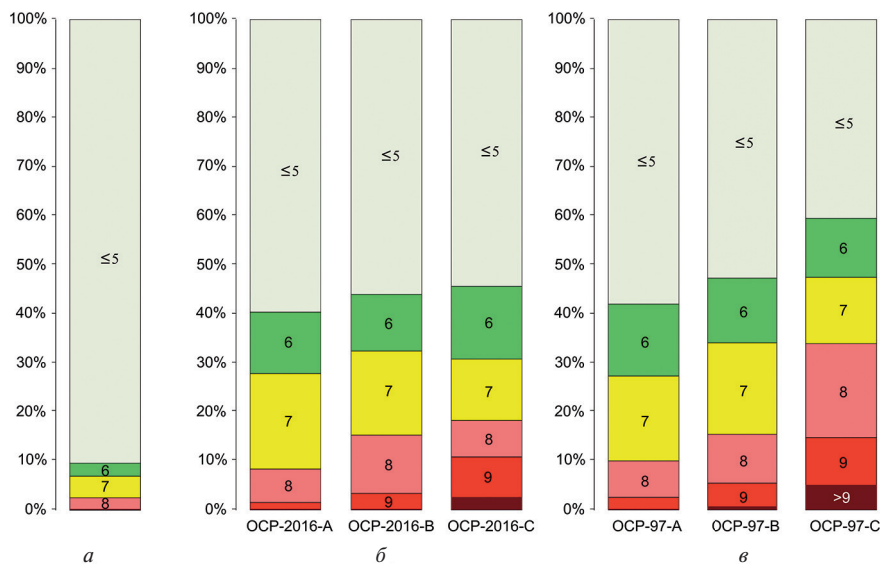


Рис. 1. Сопоставление площадей разной балльности на картах ОСП-97 и ОСП-2016 и реальных землетрясений *а* – доли суммарной площади теоретических изосейст 6, 7, 8 и 9 баллов от землетрясений в 1997–2022 гг., умноженные на 20; *б* – доли площадей зон разной балльности (6 и более) на картах ОСП-2016; *в* – на картах ОСП-97; площадь территории России принята за 100%; карты с пометкой “А” отвечает вероятности 0.1 превышения соответствующей интенсивности за 50 лет, карты “В” – 0.05, карты “С” – 0.01

торая была создана большим коллективом авторов под руководством В.И. Уломова. Модель включает в себя комбинацию:

- сейсмичности вдоль линейных структур – сейсмолинеаментов, выделяемых как оси трёхмерных сейсмоактивных разломных структур, которые отражают структурированность сейсмичности и служат основным каркасом ЛДФ-модели;

- сейсмичности на доменах, охватывающих квазиоднородные в тектоническом и геодинамическом отношении объёмы геологической среды и характеризующихся рассеянной сейсмичностью;
- отдельных потенциальных очагов землетрясений.

Предполагается, что внутри структур сейсмические события имеют идентичное положение эпицент-

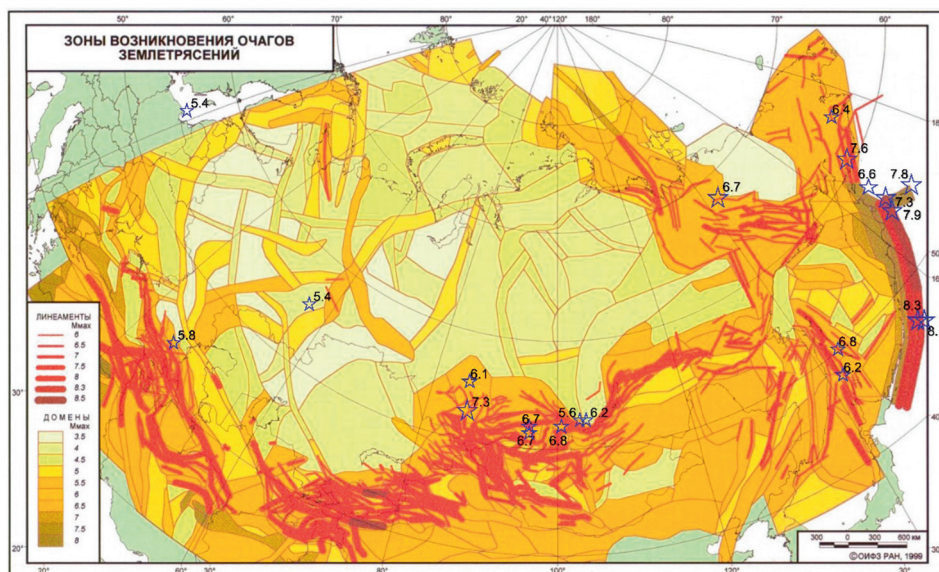


Рис. 2. ЛДФ-модель, на основе которой построены карты ОСП-97, и эпицентры сильных землетрясений с 1997 г. Сейсмолинеаменты показаны красными линиями, толщина которых соответствует максимальной магнитуде; максимальные магнитуды для доменов обозначены цветом; звёздочки – эпицентры, цифры рядом – магнитуда

тров и одинаковую удельную повторяемость, равно зависящую от магнитуды. Для каждого элемента определена максимальная возможная магнитуда. Это позволяет сгенерировать синтетический каталог землетрясений на длительный период. ЛДФ-модель, которая легла в основу карт ОСР-97, показана на рисунке 2. На карту также нанесены эпицентры сильных землетрясений, произошедших с 1997 г.

Обращает на себя внимание тот факт, что не все эпицентры сильных землетрясений приурочены к линеаментам, при этом их магнитуда во многих случаях превышает максимальную магнитуду соответствующих доменов. Чтобы разобраться с тем, насколько ЛДФ-модель соответствует реальной сейсмичности, рассмотрим северо-восточную часть России. Именно здесь зафиксированы самые яркие пропуски на карте ОСР-97: Олюторское землетрясение в 2006 г. и Илин-Тасское в 2013 г. Проведён сравнительный анализ магнитудно-частотного распределения, полученного из синтетического каталога на основе ЛДФ-модели, нормированного на период 39 лет, и реального каталога за 1982–2020 гг. [22] (рис. 3). Оказалось, ЛДФ-модель завышает число событий во всех магнитудных диапазонах примерно в 2–3 раза. Этого недостаточно, чтобы объяснить четырёхкратное расхождение на рисунке 1, поэтому мы обратились к пространственному распределению фактических и модельных землетрясений (рис. 4).

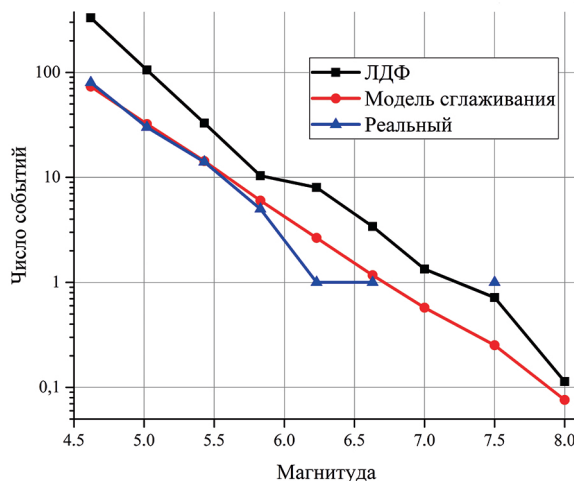


Рис. 3. Магнитудно-частотное распределение для реального каталога землетрясений восточного сектора российской Арктики за 1982–2020 гг. (треугольники) и ЛДФ-модели, приведённой к эквивалентному периоду 39 лет (квадраты)

Кружки – распределение для модели сглаживания

Из рисунка 4 хорошо видно, что ЛДФ-модель даёт слишком грубое разделение региона на области разной активности. В основном это большие участки, внутри которых плотность эпицентров равномерна. Завышение сейсмической опасности на

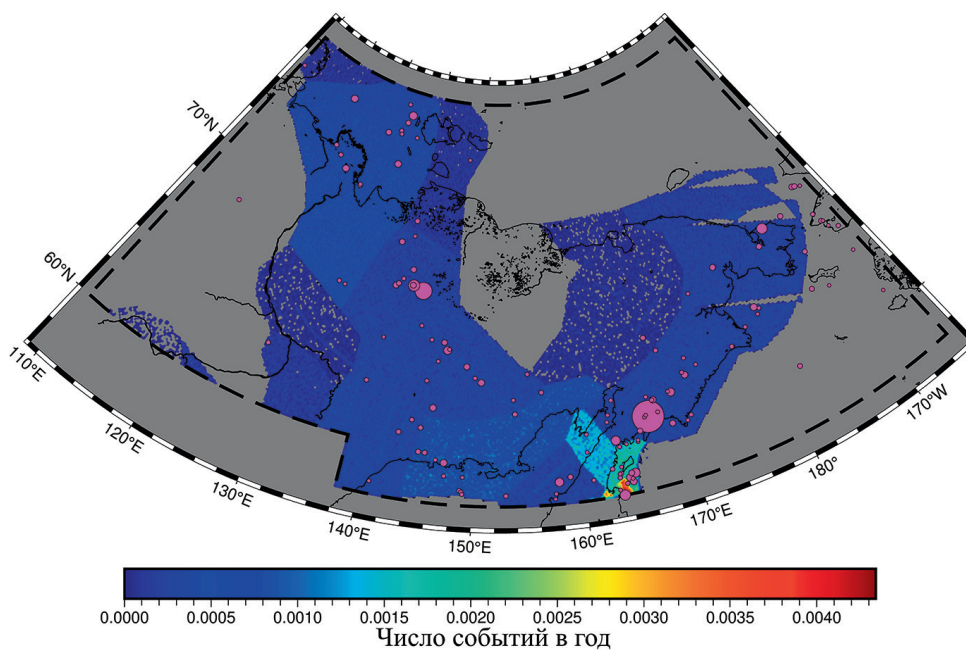


Рис. 4. Пространственное распределение фактических и модельных землетрясений восточного сектора российской Арктики с $M \geq 4.6$

Кружки – эпицентры фактических землетрясений за 1982–2020 гг., их размеры возрастают с увеличением магнитуды; цветом показана плотность числа модельных землетрясений в год; использовалась ЛДФ-модель, лежащая в основе ОСР-2016 [23]

больших территориях объясняется одновременным общим завышением ожидаемого числа землетрясений и чрезмерным расширением зон их возможного проявления. Недостатки моделей распространения сейсмических воздействий от потенциальных очагов в рамках общего сейсмического районирования имеют второстепенный характер.

В чём же причины завышения ожидаемого общего числа землетрясений? Считается, что карты ОСР-97 и их модификации являются вероятностными. На самом деле это не совсем так. Во-первых, многие параметры модели не определены на основе анализа данных, а назначены экспертами. Это, в частности, касается границ, максимальной магнитуды доменов, положения и сегментирования сейсмолинеаментов, применения гипотезы характеристических землетрясений. Во-вторых, карты не используются как вероятностные. Три типа карт (А, В, С), формально соответствующие разной вероятности превышения заданного уровня сейсмического воздействия, считаются нормативными для трёх видов объектов. По-видимому, это следствие двух основных факторов. Во-первых, целью ВАСО было внедрение в методику сокращения ущерба от землетрясений риск-ориентированного подхода с подключением страховых и перестраховочных компаний. В России расчёты сейсмического риска проводились весьма ограниченно, а система страхования от стихийных бедствий лишь начинает формироваться. Во-вторых, на момент создания ОСР-97 надёжные каталоги землетрясений с достаточно низкой представительной магнитудой были составлены для временного интервала менее 20 лет. Ещё один немаловажный фактор заключается в том, что методология ВАСО была разработана К. Корнеллом в 1968 г. именно для системы сейсмолинеаментов и доменов, считающихся однородными внутри каждого элемента. С развитием вычислительной техники стали использовать синтетические каталоги, и необходимость в модели Корнелла отпала, однако она уже превратилась в догму. Возможное завышение оценок в рамках этой модели неоднократно отмечалось в литературе [24].

В чём же причины пропусков сильных землетрясений на картах ОСР? Как правило, очаги сильных землетрясений можно приурочить к какому-либо тектоническому разлому, идентифицируемому геологическими и геоморфологическими методами. Поэтому считается, что, помимо мест, где землетрясения уже происходили, они могут случаться на других участках разлома или даже там, где они ещё не фиксировались. Но иногда (см. рис. 2) землетрясение может произойти там, где разлом ещё не установлен. Обычно это объясняют либо плохой изученностью района, либо тем, что расположенный на глубине разлом не проявил себя на поверхности земли или какими-либо аномалиями геофизических полей. Такие эпизоды стимулируют обновле-

ние карт сейсмолинеаментов, что с каждым разом приводит к увеличению сейсмической опасности. Кроме того, большую роль играет недооценка максимальной возможной магнитуды на сейсмолинеаменте, определяемой по его длине. В последние годы широко обсуждаются случаи многосегментных разломов, однако в рамках ВАСО пока не предусмотрено решений, учитывающих такую возможность.

Нужны ли данные о разломах и как можно улучшить оценки в рамках вероятностного подхода? Зачастую основой карт ОСР служат ЛДФ-модели, опирающиеся на геометрию активных разломов. Однако данные о разломах и их параметры, как отмечалось выше, нередко субъективны, поэтому в зарубежной литературе ведутся споры о том, можно ли для моделирования зон ВОЗ использовать только каталоги землетрясений [24]. Для этого предлагают разные способы сглаживания плотности эпицентров, в основе которых лежит закон Гутенберга—Рихтера [25]: плотность редких, но более сильных землетрясений может оцениваться по плотности более частых, но менее сильных. Закон работает в достаточно больших областях, да и низкие плотности зарегистрированных землетрясений вынуждают к понижению детальности. В результате детальность может оказаться не лучше той, которая достигается в ЛДФ-моделях.

Недавно в работе [26] был предложен высококонтрастный метод сглаживания сейсмичности, в котором соблюдено условие рассмотрения достаточно больших областей для применения закона Гутенберга—Рихтера. Основная идея состоит в том, что территория сканируется кругами большого радиуса (100 км), в границах которых оцениваются параметры закона Гутенберга—Рихтера, но их значения приписываются среднему положению эпицентров, а не центру круга, как это делается обычно. Полученные показатели нормируются на размер круга с учётом фрактальности, что обеспечивает совпадение магнитудно-частотного распределения (МЧР) по всей области и суммы локальных МЧР. Методика получила наименование “модель среднего положения”. На рисунке 5 показано пространственное распределение полученных по этой методике модельных землетрясений для конкретного региона. Видно, что распределение значительно более детальное, чем при ЛДФ-модели. Хорошее совпадение МЧР для всей модели с исходными данными отражено на рисунке 3.

Модель среднего положения может быть легко реализована в виде синтетического каталога землетрясений. Для этого с помощью генератора случайных чисел по интегральному МЧР сначала выбирают время и магнитуду каждого события, а затем — положение эпицентра по локальным значениям плотности эпицентров данной магнитуды, рассчитанным на основе локальных оценок закона Гутенберга—Рихтера.

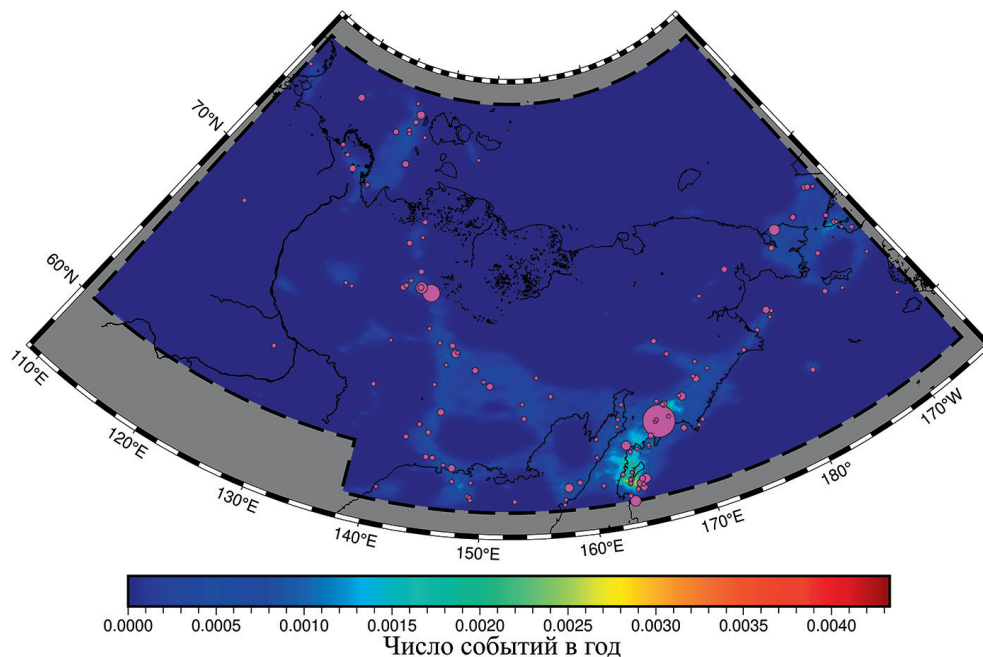


Рис. 5. Пространственное распределение фактических и модельных землетрясений ($M \geq 4.6$) в восточном секторе российской Арктики

Кружки – эпицентры фактических землетрясений за 1982–2020 гг.; цветом показана плотность модельных землетрясений в год; соответствие цветов плотности совпадает с рисунком 4; использована модель среднего положения [26], построенная по событиям с $M \geq 4.0$ за 1982–2020 гг.

Синтетический каталог можно использовать для количественной проверки соответствия модели реальным землетрясениям с помощью так называемого L-теста [27]. Идея теста состоит в следующем. Территория разбивается на k ячеек, например, размером 0.1×0.1 градусов по широте и долготу, а магнитудный диапазон – на m интервалов шириной, например, 0.1. По модели или синтетическому каталогу определяются вероятности реализации числа событий $l = (0, 1, \dots)$ за рассматриваемый период в каждой из $(k \times m)$ ячеек. Затем по каталогу реальных событий (предполагая их независимость) вычисляется совместная вероятность L реализации зарегистрированного числа событий в соответствующих ячейках. Результаты сравниваются с распределением аналогичных значений, полученных по отрезкам синтетического каталога и эквивалентным реальному распределению в пределах установленного периода. Чем ближе L к медиане полученного распределения, тем больше модель соответствует реальным данным. Если L выходит за доверительные границы распределения, соответствие модели реальным данным должно быть отвергнуто. В рассмотренном случае L-тест показал очень хорошее совпадение. Заметим, что этот результат нетривиален, так как модель строилась по событиям $M \geq 4.6$, а тест проводился для событий с $M \geq 4.6$, число которых – менее половины зарегистрированных землетрясений. ЛДФ-модель не была подтверждена.

Для расчёта карт ОСР можно использовать синтетический каталог, при этом в модель необходимо включить глубины очагов землетрясений. В ЛДФ-модели для каждого элемента (линеамента или домена) задаётся интервал глубин, в рамках которого распределение считается равномерным. В синтетическом каталоге по модели среднего положения глубина очага рассматривается как случайная величина. Установлено, что в сейсмоопасных регионах России, за исключением Курило-Камчатской зоны, распределение глубин очагов хорошо аппроксимируется распределением Вейбулла. Это позволяет получать локальные оценки одного из параметров распределения по методу среднего положения, если принять, что значение второго параметра однородно. Соответственно, для каждого события в синтетическом каталоге глубина очага определяется с помощью генератора случайных чисел. Для региона на рисунке 5 была построена пробная карта, аналогичная ОСР-97-А. Как и ожидалось, площадь зон 6, 7 и 8 баллов оказалась примерно в 4 раза меньше, чем на карте ОСР-97-А. Расхождение ещё больше для карты ОСР-2015-А, так как на ней после Олюторского и Илин-Тасского землетрясений соответствующие зоны были существенно расширены.

Важное преимущество ВАСО, особенно при использовании синтетического каталога, содержащего условные времена событий, состоит в том, что возможен учёт фактора времени для оценки сейсмического риска. На картах ОСР зоны одной и той

же балльности могут быть образованы как за счёт редких, но сильных событий, так и частых, но более слабых, происходящих в разное время на обширной территории. В первом случае разрушения будут наблюдаться одновременно на большой территории, во втором эффект будет каждый раз локальным и в разное время. При прочих равных условиях совокупный накопленный ущерб в первом варианте будет значительно больше.

Улучшить оценки ВАСО помогает и учёт афтершоков. Афтершоки сконцентрированы в пространстве и времени вблизи отдельных землетрясений за относительно короткий период, охваченный каталогом землетрясений. Использование полного каталога приводило бы к локальному завышению рисков вокруг эпицентров землетрясений. Поэтому при проведении оценок обращаются к каталогам, из которых афтершоки удалены. Однако это влечёт за собой занижение общей сейсмической опасности, поскольку не учитываются даже сильные афтершоки, например, второе землетрясение 6 февраля 2023 г. в Турции. Разрушения от сильных повторных толчков могут быть очень существенными, поскольку в результате первого толчка нарушается конструктивная прочность зданий. Чтобы учесть опасность афтершоков в мировой практике применяется стохастическое моделирование на основе широко известной модели ETAS (Epidemic-type aftershock sequences) [28]. Стандартная модель ETAS обычно завышает количество афтершоков, но её модификация на основе закона продуктивности [29] предсказывает в синтетическом каталоге примерно такое же их количество, которое было удалено из каталога фактических землетрясений [30].

Один из важных возможных недостатков методики составления карт ОСР-97 и их модификаций состоит в применении гипотезы характеристических землетрясений, в соответствии с которой повторяемость сильнейших событий на разломах может быть многократно выше, чем по закону Гутенберга–Рихтера. В последние годы эта гипотеза всё больше подвергается критике. Видимый избыток сильнейших землетрясений объясняется тем, что магнитудно-частотное распределение исследуется в узких пространствах. Наоборот, находится всё больше подтверждений закона Гутенберга–Рихтера в областях, размер которых по всем направлениям пятикратно превышает очаг самого крупного землетрясения. Это подводит к определению максимально возможной магнитуды в региональном масштабе. Обычно эпизодов землетрясений на таких больших площадях достаточно, чтобы оценить максимальную возможную магнитуду статистическими методами [31]. Но тогда возникает вопрос: где именно в пределах региона возможны сильнейшие землетрясения? Эта задача, на наш взгляд, должна решаться независимо ввиду масштабности пространства и времени для таких событий. Один из возможных способов, кото-

рый развивается уже около полувека, — распознавание мест предполагаемого возникновения сильных землетрясений [32].

Весьма сложная и малоизученная проблема вероятностных оценок — нестационарность сейсмических процессов и интервалов времени, в которых сейсмическую активность можно считать стабильной. Учёные постепенно приходят к консенсусу, что ВАСО может давать более или менее надёжные прогнозы лишь на 50 лет. Но даже за такой период вариации сейсмической активности могут быть значительными. Это оправдывает исследования по средне- и долгосрочному прогнозу землетрясений, которые позволяют перейти к зависящим от времени оценкам сейсмической опасности. Такие оценки становятся всё более популярными в мире. Недавно была предложена простая и наглядная методика [33] использования статистики успехов и неудач какого-либо прогнозного метода для изменения во времени параметров модели зон ВОЗ, представленной аналогично модели среднего положения. Параметры меняются неравномерно по пространству и магнитуде в зависимости от значения управляющего критерия, который учитывается в прогнозе. Другие способы учёта фактора времени — исследование временных вариаций полей деформаций и напряжений. Многообещающими, особенно в высокоподвижных районах Курило–Камчатской зоны субдукции, являются геодинамические исследования на основе ГНСС-геодезии (глобальные навигационные спутниковые системы) [34], спутниковой интерферометрии [35], а также тектонофизические методы [36].

* * *

Использование в строительной отрасли условно вероятностных карт ОСР как детерминистских вполне оправдано. Строителям не важно, с какой вероятностью в данном месте за 50 лет возможны сотрясения силой 8 баллов. Они хотят получить однозначный ответ на вопросы: случится ли сотрясение силой в 8 баллов в ближайшие 50 лет и нужно ли применять сейсмоусиливающие технологии? Но детерминистский подход всегда основан на заключении экспертов, что неизбежно приводит к соблазну завязать реальную сейсмическую опасность, дабы избежать ответственности в случае её недооценки. Нельзя исключать и лоббирование определённых экспертных решений со стороны заинтересованных лиц или компаний. Завышение сейсмической опасности приводит к удорожанию строительства, иногда весьма значительному. В результате неоправданные издержки фактически наносят косвенный ущерб от несостоявшихся землетрясений. Очевидно, что избежать расходов на сейсмостойкое строительство нельзя, но можно их регулировать. Если построить адекватные модели сейсмического риска, то всегда можно рассчитать экономически допустимый объём средств, выделяемый на сейсмоусиле-

ние в пределах какого-то предприятия, населённого пункта, района и т.д. А вот куда именно направлять эти средства, нужно решать на основе детерминистских подходов, включая моделирование очагов конкретных землетрясений и сценариев воздействия на конкретные объекты.

Детерминистский подход применяется при определении сейсмической опасности, в частности для атомных электростанций. Для подобных объектов должна приниматься во внимание даже очень небольшая вероятность сильных землетрясений (10^{-5} – 10^{-6} в год). Уверенно оценить такую низкую вероятность, например по палеосейсмическим данным, невозможно, поэтому оценка в любом случае будет экспертной, то есть детерминистской.

Таким образом, необходимо параллельно развивать вероятностное и детерминистское направления оценки сейсмической опасности. С учётом мирового опыта и потребностей России детерминистский подход, на наш взгляд, целесообразно реализовывать на уровне детального сейсмического районирования (ДСР), в основном для обеспечения строительства в высокосейсмичных регионах, включая ответственные объекты (для которых в настоящее время применяются карты В и С). Основные направления развития подхода – построение моделей очагов землетрясений, затухания сейсмических волн, генерации и распространения сейсмических волн в ближней зоне, учёта локальных грунтовых условий, создание синтетических акселерограмм, баз данных фактических записей сильных движений. Кроме того, нужно восстанавливать информацию о прошлых землетрясениях, проводить палеосейсмические исследования.

Вероятностный подход должен опираться на максимально объективные и подробные данные, поэтому нужны наиболее полные и однородные каталоги землетрясений. Объём необходимой информации должен обеспечиваться за счёт доступных и открытых баз данных и алгоритмов их обработки. На стыке вероятностного и детерминистского подходов находятся высокоточные геодинамические исследования с применением спутниковых технологий (ГНСС, спутниковая интерферометрия).

Проблема нестационарности сейсмических процессов даже на отрезках в десятки лет актуализирует анализ сейсмической опасности, зависящий от времени. Качество различных алгоритмов прогноза землетрясений пока не даёт оснований для оперативного реагирования. Но если оперировать статистикой успехов и неудач работы алгоритма, эти результаты можно использовать для включения в оценки ВАСО фактора времени.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность С.А. Перетокину за помощь в составлении синтетического каталога землетрясений по ЛДФ-модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.iii.org/fact-statistic/facts-statistics-global-catastrophes>
2. Wyss M., Nekrasova A., Kossobokov V. Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates // *Natural Hazards*. 2012, vol. 62, iss. 3, pp. 927–935.
3. Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 91–97.
Shebalin P.N., Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Skorkina A.A. Why are new approaches to seismic hazard assessment required? // *Doklady Earth Sciences*. 2022, vol. 507, no. 1, pp. 930–935. (In Russ.)
4. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1968, vol. 58, iss. 5, pp. 1583–1606.
5. Giardini D. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) – 1992/1999 // *Annali di Geofisica*. 1999, vol. 42, iss. 6, pp. 957–974.
6. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб: 1:8000000. 4 листа / Гл. ред. В.Н. Страхов, В.И. Уломов; отв. сост. В.И. Уломов, Л.С. Шумилина, А.А. Гусев и др. М.: Объединённый институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 1999.
Set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation – GSZ-97. Scale: 1:8000000. 4 sheets / Ed.-in-chief V.N. Strakhov, V.I. Ulomov; responsible compilers V.I. Ulomov, L.S. Shumilina, A.A. Gusev et al. Moscow: United Institute of Physics of the Earth named after O.Yu. Schmidt, Russian Academy of Sciences, 1999. (In Russ.)
7. Rikitake T. Classification of earthquake precursors // *Tectonophysics*. 1979, vol. 54, no. 3–4, pp. 293–309.
8. Федотов С.А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии // Вопросы инженерной сейсмологии. 1965. № 10. С. 66–93.
Fedotov S.A. Patterns of distribution of strong earthquakes in Kamchatka, the Kuril Islands and North-East Japan // *Problems of Engineering Seismology*. 1965, no. 10, pp. 66–93. (In Russ.)
9. Bakun W.H., Lindh, A.G. The Parkfield, California, earthquake prediction experiment // *Science*. 1985. vol. 229, pp. 619–624.
10. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of $1/f$ noise // *Physical Review Letters*. 1987, vol. 59, no. 4, pp. 381–384.
11. Turcotte D.L., Smalley Jr. R.F., Solla S.A. Collapse of loaded fractal trees // *Nature*. 1985, vol. 313, no. 6004, pp. 671–672.
12. Olami Z., Feder H.J.S., Christensen K. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular

- automaton modeling earthquakes // *Physical Review Letters*. 1992, vol. 68, no. 8, pp. 1244–1247.
13. *Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F.* Earthquakes Cannot Be Predicted // *Science*. 1997, vol. 275, no. 5306, p. 1616.
 14. *Кособоков В.Г., Щепалина П.Д.* Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // *Физика Земли*. 2020. № 1. С. 43–52.
Kossobokov V.G., Shchepalina P.D. Times of increased probabilities for occurrence of world's largest earthquakes: 30 years hypothesis testing in real time // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020, vol. 56, no. 1, pp. 36–44. (In Russ.)
 15. *Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. 2011. № 2. С. 53–59.
Saltykov V.A. A statistical estimate of seismicity level: the method and results of application to Kamchatka // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2011, vol. 5, no. 2, pp. 123–128. (In Russ.)
 16. *Spassiani I., Falcone G., Murru M., Marzocchi W.* Operational Earthquake Forecasting in Italy: validation after 10 years of operativity // *Geophysical Journal International*. 2023, vol. 234, no. 3, pp. 2501–2518.
 17. *Heaton T.* A Model for a Seismic Computerized Alert Network // *Science*. 1985, vol. 228, no. 4702, pp. 987–990.
 18. *Finazzi F., Fassò A.* A statistical approach to crowd-sourced smartphone-based earthquake early warning systems // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2016, vol. 31 (7), pp. 1649–1658.
 19. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён до 1975 г. / Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. New catalogue of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975. / Eds. N.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin. Moscow: Nauka, 1977. (In Russ.)
 20. *Кособоков В.Г., Некрасова А.К.* Карты Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP) ошибочны // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2011. № 1. С. 65–76.
Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) maps are misleading // *Problems of Engineering Seismology*. 2011, vol. 38, no. 1, pp. 65–76. (In Russ.)
 21. *Castaños H., Lomnitz C.* PSHA: is it science? // *Engineering Geology*. 2002, vol. 66, iss. 3–4, pp. 315–317.
 22. *Gvishiani A.D., Vorobieva I.A., Shebalin P.N. et al.* Integrated earthquake catalog of the eastern sector of the Russian arctic // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022, vol. 12, no. 10, p. 5010.
 23. *Уломов В.И., Богданов М.И.* Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населённых пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // *Инженерные изыскания*. 2016. № 7. С. 49–60.
Ulomov V.I., Bogdanov M.I. Explanatory note to the set of GSZ-2016 maps and a list of settlements located in seismically active zones // *Ingenerynye izyskaniya*. 2016, no. 7, pp. 49–60. (In Russ.)
 24. *Gerstenberger M.C., Marzocchi W., Allen T. et al.* Probabilistic seismic hazard analysis at regional and national scales: State of the art and future challenges // *Reviews of Geophysics*. 2020, vol. 58, e2019RG000653.
 25. *Gutenberg B., Richter C.F.* Frequency of earthquakes in California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1944, vol. 34 (4), pp. 185–188.
 26. *Vorobieva I., Grekov E., Krushelnitskii K. et al.* High resolution seismicity smoothing method for seismic hazard assessment // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024, vol. 24, no. 1, ES1003.
 27. *Shebalin P.N., Baranov S.V., Vorobieva I.A. et al.* Seismicity Modeling in Tasks of Seismic Hazard Assessment // *Doklady Earth Sciences*. 2024, vol. 515, pp. 514–525.
 28. *Zhuang J., Ogata Y., Vere-Jones D.* Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction // *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, B05301.
 29. *Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Earthquake Productivity Law // *Geophysical Journal International*. 2020, vol. 222, pp. 1264–1269.
 30. *Baranov S.V., Narteau C., Shebalin P.N.* Modeling and prediction of aftershock activity // *Surveys in Geophysics*. 2022, vol. 43, no. 2, pp. 437–481.
 31. *Pisarenko V.F., Rodkin M.V.* Approaches to Solving the Maximum Possible Earthquake Magnitude (M_{\max}) Problem // *Surveys in Geophysics*. 2022, vol. 43, pp. 561–595.
 32. *Гвишиани А.Д., Соловьёв А.А., Дзобоев Б.А.* Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // *Физика Земли*. 2020. № 1. С. 5–29.
Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Soloviev A.A. Problem of recognition of strong-earthquake-prone areas: a state-of-the-art review // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020, vol. 56, no. 1, pp. 1–23. (In Russ.)
 33. *Shebalin P., Narteau C., Holschneider M.* From alarm-based to rate-based earthquake forecast models // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2012, vol. 102, no. 1, pp. 64–72.
 34. *Vladimirova I.S., Lobkovsky L.I., Gabsatarov Y.V. et al.* Patterns of the seismic cycle in the Kuril Island arc from GPS observations // *Pure and Applied Geophysics*. 2020, vol. 177, no. 8, pp. 3599–3617.
 35. *Михайлов В.О., Тимошкина Е.П.* Геодинамическое моделирование процесса формирования

и эволюции структур литосферы: опыт ИФЗ РАН // Физика Земли. 2019. № 1. С. 122–133.

Mikhailov V.O., Timoshkina E.P. Geodynamic modeling of the process of the formation and evolution of lithospheric structures: the experience of Schmidt institute of Physics of the Earth, RAS // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019, vol. 55, no. 1, pp. 102–110. (In Russ.)

36. *Ребецкий Ю.Л.* Тектонофизическое районирование сейсмогенных разломов Восточной Анатолии и Караманмарашские землетрясения 06.02.2023 г. // Физика Земли. 2023. № 6. С. 37–65.

Rebetsky Yu.L. Ectonophysical zoning of seismogenic faults in Eastern Anatolia and February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2023, vol. 59, no. 6, pp. 851–877. (In Russ.)

MODERN APPROACHES TO REDUCING DAMAGE FROM EARTHQUAKES

P.N. Shebalin^{a,*}

^a*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: shebalin@mitp.ru*

The experience of the catastrophic earthquake on February 6, 2023 in Turkey reminds us of the need to improve the seismic hazard reduction system in Russia as well. The main protective measure is earthquake-resistant construction based on General Seismic Zoning (GSZ) maps. The current maps, as in global practice, are based on a probabilistic seismic hazard assessment. Over the 25 years of use in Russia, GSZ maps have generally justified themselves. Errors made, both in the direction of underestimating the hazard in the areas of several strong earthquakes and overestimating the hazard in large areas, were inevitable at the level of data available at the time the maps were created.

The work analyzes the most likely causes of errors in the GSZ-maps, ways to overcome them, argues for the need to introduce a risk-based approach to reduce the total economic damage from earthquakes, including unjustified costs for anti-seismic reinforcement of structures, discusses the different goals of probabilistic and deterministic approaches to assessing seismic hazard.

Keywords: seismic hazard assessment, earthquake forecast, general seismic zoning, earthquake early warning systems.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

© 2024 г. Е.А. Вознесенский^{a,b,*}

^aИнститут геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия

^bГеологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: eugene@geoenv.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024 г.

После доработки 26.04.2024 г.

Принята к публикации 18.07.2024 г.

В статье рассматриваются закономерности распространения проявлений опасных геологических процессов на территории России и вопросы их прогнозирования. Показано, что локальный прогноз развития опасных процессов всегда направлен на конкретный объект, явление или группу явлений в пределах ограниченных территорий и подразумевает расчёт параметра, характеризующего устойчивость массива грунтов, для чего непременно применяется расчётная модель. Успех прогноза зависит от качества модели и достоверности введённых в неё экспериментальных параметров. При детерминированном расчёте для минимизации числа возможных следствий очевидным или неочевидным образом пренебрегают вариативностью причин, вызывающих опасный процесс. В вероятностном варианте с помощью обычного перебора рассматривается большее количество возможных сочетаний действующих факторов. К сожалению, нельзя утверждать, что это повышает надёжность расчётов, поскольку их точность зависит от качества используемой расчётной модели и учёта неоднородности среды.

Ключевые слова: опасные процессы, оползень, карст, геокриологические опасности, радон, геологический риск, прогноз, модель.

DOI: 10.31857/S0869587324080061, EDN: FCPBJA

Острейшая проблема современной цивилизации – осмысленное взаимодействие человеческого общества со средой его обитания, познание законов и последствий этого взаимодействия. Планирование потребления природных ресурсов уже не может основываться лишь на экономике, но требует моделирования природопользования в целом с учётом социальных и управленческих аспектов для разработки долгосрочной стратегии существования цивилизации.



ВОЗНЕСЕНСКИЙ Евгений Арнольдович – доктор геолого-минералогических наук, директор ИГЭ РАН, профессор геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Как предсказывал В.И. Вернадский, человек стал значимой геологической силой: огромны объёмы переваливаемых им горных пород при разработке полезных ископаемых (порядка 200 т на каждого жителя планеты в год, и это только в горнодобывающей отрасли, без учёта строительной), объёмы созданных в северном полушарии водохранилищ уже влияют на прецессию земной оси, а следовательно, и на темпы изменения климата. Логистические коридоры, по которым перемещаются ресурсы общества, многократно превышают окружность планеты. Так, протяжённость автомобильных дорог только России превышает 1.5 млн км, хотя по этому показателю наша страна находится лишь на 5-ом месте в мире. А есть ещё железные дороги, водные пути, трубопроводный транспорт, линии электропередач.

Таким образом, современная цивилизация не просто извлекает полезные ископаемые и возводит всё более сложные инженерные сооружения, она использует литосферу практически в целом как свой жизнеобеспечивающий ресурс.

Геологические процессы – неотъемлемая часть реакции литосферы на нарушение её равновесия как

за счёт присущей ей природной динамики (тектонические движения, деятельность рек, выветривание), так и в результате техногенных воздействий, когда она реагирует на вмешательство человека.

Проблема понимания природы и закономерностей развития геологических процессов в значительной мере связана с невозможностью прямого наблюдения за ними: в процессы вовлекаются массивы грунтов, а судим мы о них, давая в том числе и количественные оценки, по проявлениям на поверхности. Процесс реконструируется, а, по сути, моделируется, либо по данным из отдельных точек, например скважин, либо по площадным изменениям на поверхности, в том числе по результатам дистанционного зондирования Земли, либо по изменениям параметров полей Земли с привлечением геофизических методов. Мониторинг процессов – это, по существу, наблюдения за их проявлениями опять же на поверхности или в отдельных её точках.

Критерием корректного понимания механизма и достаточной в практическом отношении изученности любого геологического процесса выступает надёжность прогноза его развития. Решение именно прогнозной задачи характеризует наши возможности предвидеть и предотвращать – инженерным или иным путём – неблагоприятные последствия опасных геологических процессов. Цель настоящей статьи – показать состояние исследований в этой научной области. Россия – огромная страна, а потому на её территории в той или иной мере проявляются, вероятно, все известные геологические процессы. В связи с этим остановимся лишь на некоторых их

группах, имеющих большое значение для проживания людей и функционирования инфраструктурных объектов.

СКЛОНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Начать следует со склоновых процессов. О важности их специализированного изучения для человеческого общества свидетельствует количество научных исследований по этой тематике. Так, на последнем инженерно-геологическом конгрессе в Чэнду (Китай, сентябрь 2023 г.) доля соответствующих докладов составила 60% всех научных сообщений. Примерно такая же ситуация характерна для других подобных научных мероприятий.

Изучение природы и механизмов смещения пород на склонах – важная задача современной инженерной геологии. Смещение обычно происходит под действием силы тяжести, но кинематика, объёмы и последствия бывают разными. Эти процессы приводят к формированию самостоятельного склонового ряда континентальных осадочных отложений, а также выступают важным фактором инженерно-геологических условий территории в целом. Следует учитывать, что разнообразие склоновых процессов и вызываемых ими явлений – от оползней и обвалов до каменных лавин, курумов и соляфлюкции – огромно.

Рассмотрим проблему на примере оползневых процессов, морфологическое разнообразие которых велико. Как ни странно, до сего времени не сформулировано общепринятого определе-

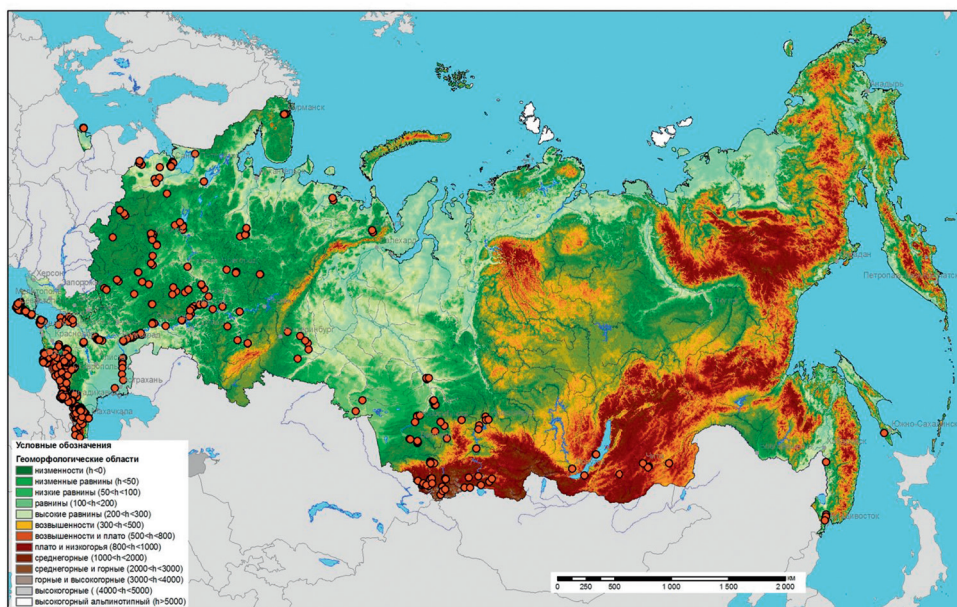


Рис. 1. Проявление активных оползней на территории России в 2020 г.

Источник: по данным государственного мониторинга состояния недр; составил кандидат геолого-минералогических наук О.В. Зеркаль.

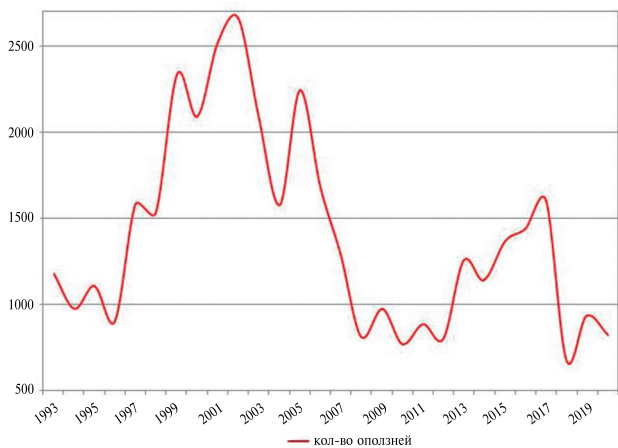


Рис. 2. Количество активных оползней на территории России в 1994–2020 гг.

Источник: по данным государственного мониторинга состояния недр; обобщены кандидатом геолого-минералогических наук О.В. Зеркалём.

ния оползня. Есть множество классификаций – по типу, механизму смещения, объёму и другим признакам, но нет единой и общей. Существуют различные подходы к предметному изучению оползней – геологический, геоморфологический, геотехнический и др. При этом разными авторами рассматривается более 20 факторов оценки регионального развития оползней, среди которых преобладающими являются состав и свойства горных пород, формирующих склон, и морфологические характеристики самого склона.

Какова же поражённость территории России оползневыми явлениями? На рисунке 1 (данные на 2020 г.) хорошо видно, что оползни концентрируются в основном в гористых районах и долинах крупных рек, что закономерно, но следует принимать во внимание и освоённость, заселённость территории. Там, где возникший даже крупный оползень не создаёт проблем человеку, он и не исследуется.

Среднегодовое количество зарегистрированных оползневых явлений на территории России составляет порядка 1500, хотя в отдельные годы отмечают

ся всплески до 2.5–2.8 тыс. (рис. 2). Этот временной ряд напоминает спектр нерегулярной динамической нагрузки, отражая сложным образом сочетающиеся вариации климата, проявления сейсмической активности и техногенные воздействия. В этом ряду выделяются, конечно, грандиозные оползни. Так, смещение Буреинского оползня 11 декабря 2018 г. привело к образованию завальной плотины высотой более 50 м и шириной до 550 м, перекрывшей долину р. Бурея, что потребовало создания искусственного прорана. А общий объём горных пород, вовлечённых в смещения на всех стадиях образования оползня, оценён суммарно в 25 млн м³ [1].

Главное в подобных ситуациях – прогноз возникновения и развития оползня, или оценка его риска. Локальный прогноз делается на основе расчёта так называемого коэффициента устойчивости склона. При этом часто отсутствует ясность положения и формы поверхности смещения, да и просто реальных границ оползневого массива.

Методы расчёта устойчивости пород на склонах весьма многочисленны – существует более 200 подходов к таким расчётам, и уже сами эти методы требуют классификации [2]. Можно выделить детерминированный и вероятностный подходы. В первом случае устойчивость определяется с использованием расчётных (статистических) характеристик. Но риск – вероятностная категория, а вероятностный анализ устойчивости основывается на получении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона в зависимости от вероятностных же функций распределения физико-механических характеристик грунтов, слагающих присклоновый массив. Основная задача такого анализа сводится к определению положения в массиве поверхности с минимальными значениями коэффициента устойчивости. Результат такого анализа зависит от выбранного метода расчёта устойчивости, количества учитываемых факторов, учёта неоднородности свойств грунтов в зоне потенциального смещения (рис. 3). Вероятность минимальна в предположении об однородности такой зоны, следовательно, важна частота опробования факторов оползнеобразования, учёта их количе-

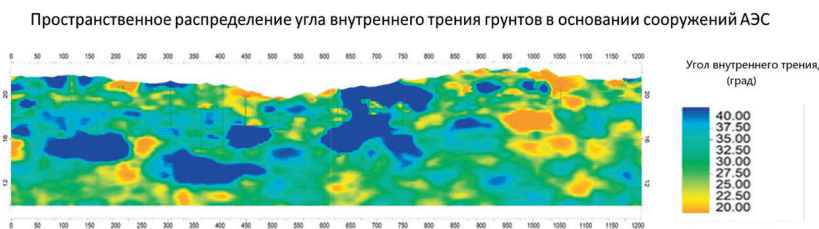


Рис. 3. Пространственное поле распределения угла внутреннего трения грунтов в основании сооружений объекта капитального строительства атомного комплекса

Источник: [3].

ства, времени реализации смещений, заложенного в рассмотрение, поскольку все факторы меняются во времени.

Итог пока неутешителен: обилие классификаций оползней свидетельствует о недостатке понимания их природы, а неумение решать прогнозные задачи — о недопонимании механизмов их развития, поэтому природа оползневых процессов остаётся актуальной проблемой не только инженерной геологии, но и геоэкологии.

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ

Характеризуя опасные процессы на территории России, около 70% площади которой занимает криолитозона, нельзя не остановиться на многочисленных геоэкологических угрозах: оттаивание многолетнемерзлых грунтов и вытаивание подземных льдов, тепловые просадки и осадки сооружений, морозобойное растрескивание и пучение грунтов, наледообразование и формирование кратеров газовых выбросов. Здесь следует выделять последствия изменения свойств мерзлых грунтов, прежде всего снижение их несущей способности, и активизацию собственно геоэкологических процессов, которые и служат основным источником угроз для инфраструктуры страны [4]. Их активность зависит от интенсивности изменений различных характеристик климата, но ещё более сильное воздействие оказывает реакция мерзлоты на нарушение условий теплообмена, вызываемого сооружениями.

Анализ проявлений геоэкологических процессов (рис. 4) показывает, что география ущерба, сопряжённого с ними, не связана напрямую ни с геоэкологическими районами, ни с темпами климатических изменений. Неблагоприятные последствия наблюдаются во всех секторах Арктики и вблизи южных границ криолитозоны во всех федеральных округах, на территории которых присутствует многолетняя мерзлота. Основные объёмы ущерба ассоциированы с длительно эксплуатируемыми сооружениями, особенно объектами линейной инфраструктуры — дорогами и трубопроводами. Этот вывод ставит на повестку дня научную задачу выработки методик содержания инфраструктурных объектов на территории криолитозоны в условиях меняющихся техногенных нагрузок и климата. Для этого требуется организовать мониторинг не только температур мерзлых толщ, но и криогенных процессов, что станет важным инструментом решения прогнозных задач.

В этой связи следует отметить пионерные работы 2022–2023 гг. Института геоэкологии РАН в сотрудничестве с Институтом мерзлотоведения СО РАН и организациями дорожной отрасли по разработке методического обеспечения организации стационарных постов мониторинга состояния мерзлых грунтов и активности геоэкологических процессов на трассах федеральных автодорог в криолитозоне. На рисунке 5 представлен перечень контролируемых на таком посту параметров окружающей среды. Несколько подобных постов уже функционируют [7].

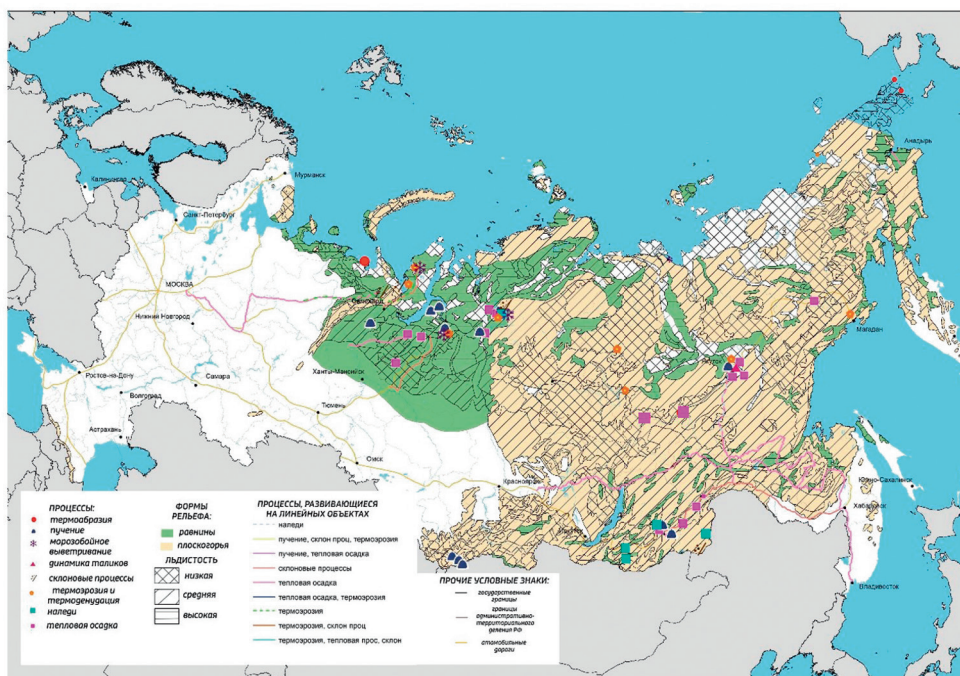


Рис. 4. Карта-схема проявлений геоэкологических процессов, с которыми был сопряжён экономический ущерб за период 2000–2015 гг.

Источник: [5].

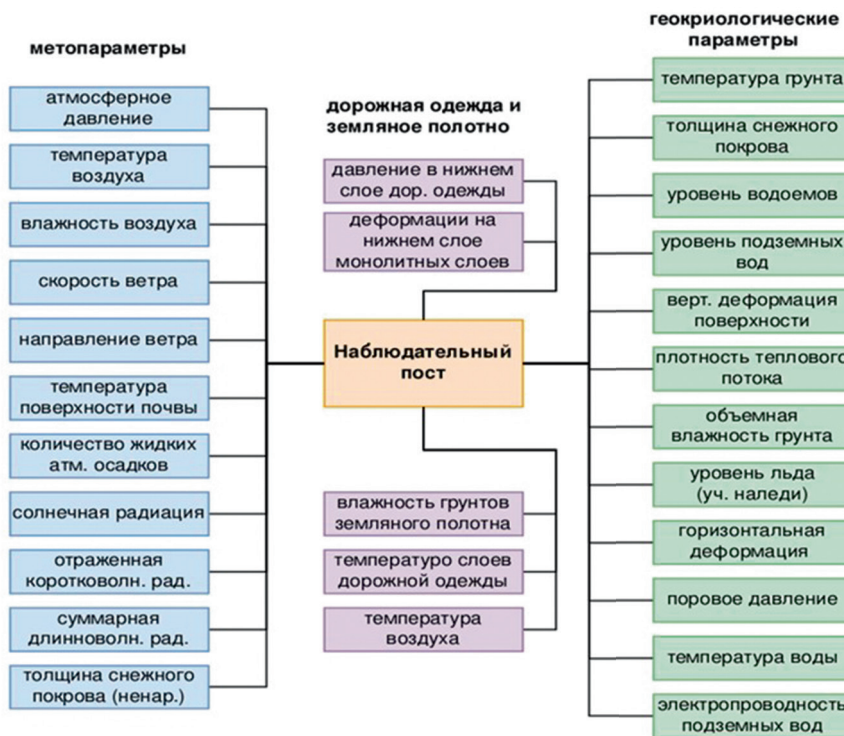


Рис. 5. Структура раздела базы данных “наблюдательный пост” на автодороге
 Источник: [6].

Полезный инструмент решения прогнозных задач – численное моделирование процессов. Так, термомеханическое моделирование позволило объяснить причину повышенной активности продольной эрозии у основания валика трубопровода. Оказалось, что эрозии способствуют не только нару-

шения поверхностного стока, обычные для линейных сооружений, но и формирование естественных дренажных канавок, связанных с тепловой просадкой поверхности [8].

Следует иметь в виду, что корректный прогноз температуры на глубине проникновения годовых

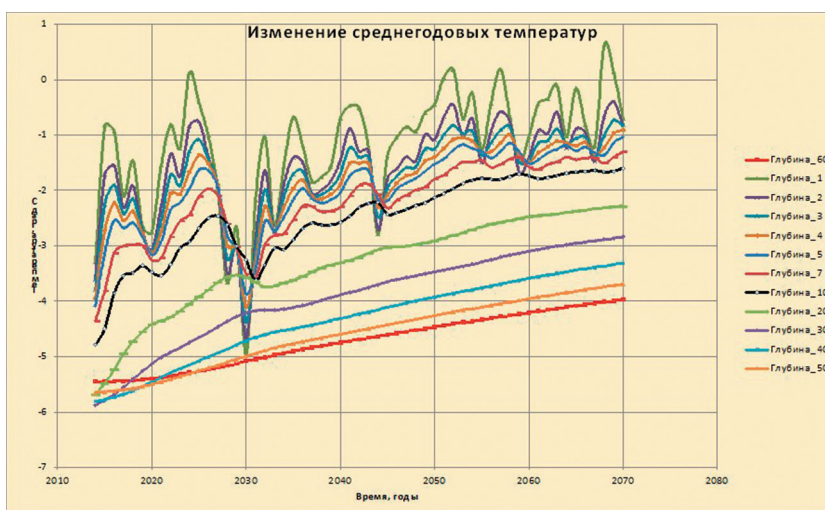


Рис. 6. Прогноз изменения температур грунта на разных глубинах для условий Центрального Ямала: сценарий RCP 8.5, глубина в метрах обозначена цветом, ненарушенные условия
 Источник: [9].

амплитуд (15–20 м) важен для проектирования, поскольку позволяет оценить, в каких температурных условиях окажутся основания сооружений на протяжении их жизненного цикла. Для оценки активности криогенных процессов в первую очередь имеет значение прогноз температурных аномалий на малых глубинах (до 10 м) (рис. 6). Например, аномально тёплые года могут привести к активизации термических просадок, холодные — к активизации пучения и наледообразования.

КАРСТ И КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫЕ ПРОВАЛЫ

Закарстованные в той ли иной мере территории занимают почти треть площади суши. На схеме (рис. 7) представлены в разной степени карстоопасные районы России. Выделены и области развития этого процесса. Степень опасности охарактеризована интегрально — в баллах с учётом прежде всего поражённости территории и диаметра провалов. При таком подходе видно, что, во-первых, карстовые явления достаточно широко распространены в пределах нашей страны — они есть везде, где на небольшой глубине в зоне влияния инженерных сооружений распространены растворимые породы значимой мощности. А во-вторых, понятно, что степень опасности обусловлена сложным комплексом факторов, важнейшие из которых — геолого-структурное положение карстующихся толщ и их минеральный состав.

Карст опасен прежде всего вероятностью образования провалов приповерхностных горных пород в расположенные ниже пустоты значительного объёма с сопутствующими повреждениями сооружений. Следовательно, оценка карстовой опасности

и её прогноз заключаются в основном в установлении факта присутствия на исследуемой территории крупных подземных полостей и степени устойчивости их кровли.

Наиболее крупные карстовые полости, как следует из рисунка 8, тяготеют к районам широкого распространения дислоцированных карбонатных пород, которые вскрываются крупными речными долинами, определяющими градиенты потоков подземных вод, а также сульфатных, гораздо более высокорстворимых пород. Наиболее изучены в этом отношении пять регионов России: город Москва, Пермский край, Нижегородская область, республики Башкортостан и Крым. Эти закарстованные территории характеризуются как определённой общностью, так и резкими различиями условий, факторов развития и проявления карстовых процессов, а также связанных с ними деформаций, которые привели к формированию заметно различающихся методических подходов к оценке карстовой опасности и прогнозу возникающих явлений [11].

Карст Москвы относится к покрытому карбонатному типу, наибольшую опасность в этих условиях может вызывать образование воронок и провалов на земной поверхности и в основании сооружений. Поэтому значимыми для оценки территории по степени опасности развития таких процессов оказались области распространения доледниковой долины размыва, где главным образом распространены карбонатные породы с высокой степенью закарстованности, и мощность перекрывающих закарстованный массив относительно водоупорных глинистых отложений. Имеют значение и степень закарстованности пород, градиенты вертикальной фильтрации, степень разуплотнения покровной толщи.

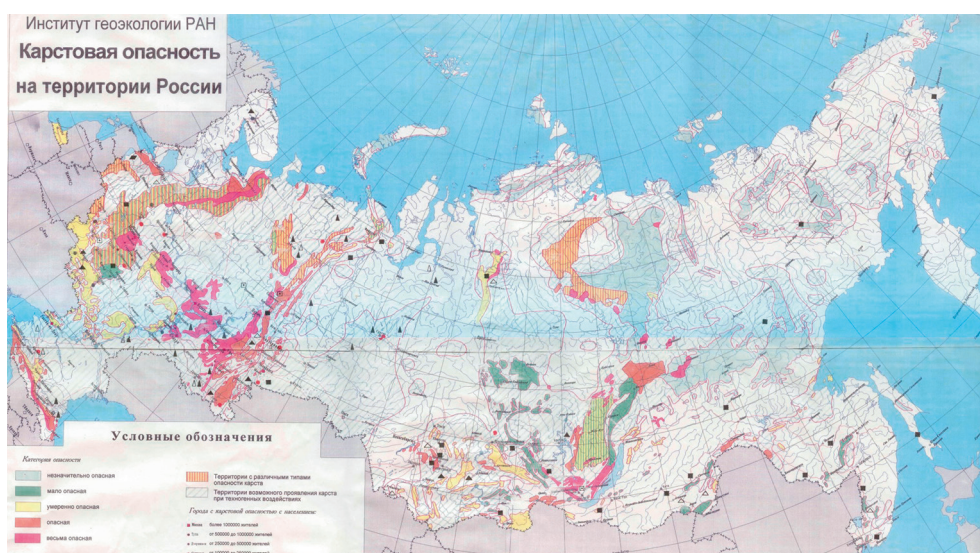


Рис. 7. Карстовая опасность на территории России

РАЙОНЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КРУПНЕЙШИХ КАРСТОВЫХ ПОЛОСТЕЙ



Рис. 8. Районы распространения крупнейших карстовых полостей
 Источник: [11].

В Пермском крае развиты все три типа карста — карбонатный, сульфатный и соляной, а также смешанный и кластокарст. Для оценки карстовой опасности здесь традиционно учитывается большой набор факторов: мощность карстующихся грунтов; расчленённость их кровли; мощность и литологический состав покрывающей толщи; наличие и мощность водоупорного прослоя и его литологический состав в покрывающей толще; режим и минерализация подземных вод. Итоговое районирование по карстовой опасности базируется на неких интегральных (обычно балльных) характеристиках.

В Нижегородской области развит карст карбонатного (известняки, доломиты, реже мергели) и сульфатного типов. Диаметры карстовых провалов варьируют от 1 до 115 м при мощности покрывающей толщи до 100 м, а глинистых отложений — до 50 м над первым от поверхности слоем карстующихся грунтов. Оценка карстово-провальной опасности здесь традиционно проводится на основании показателя интенсивности провалообразования и прогноза среднего диаметра карстовых провалов и воронок.

В Башкортостане развиты карбонатный и сульфатный, а также смешанный карбонатно-сульфатный карст и кластокарст. Площадная оценка закарстованности этой территории проводится по целому ряду показателей: плотность воронок на 1 км², коэффициент закарстованности, среднегодовое количество провалов на 1 км², наличие карстовых полостей по результатам бурения и др. Категории устойчивости территорий принято определять на основании интегральных оценок.

В Крыму развит преимущественно карбонатный открытый и закрытый карст. Качественный про-

гноз устойчивости территории выполняется на основе балльной оценки, а степень карстовой опасности определяется в зависимости от условий развития карста (в балах) и плотности карстовых воронок на 1 км². При инженерно-геологическом районировании используются такие показатели, как распространение и мощность карстующихся грунтов и их разновидность; тип карста (по характеру покрывающей толщи); структурные условия; расстояние от крупных тектонических нарушений; количество эффективных осадков (осадки минус испарение); поверхностный сток; подземный сток [11].

РАДОНОВАЯ ОПАСНОСТЬ

Природный радиоактивный газ радон и дочерние продукты его распада, накапливающиеся в замкнутых помещениях, оказываются основным источником облучения населения. Вклад этого газа в общую дозу облучения (включая техногенные источники, крупные радиационные аварии и медицинское облучение) составляет более 40%. Основной источник поступления радона в помещения — его выделение из геологической среды в основании зданий.

Потенциальная радоноопасность территории обусловлена особенностями геологического строения и количественно характеризуется плотностью потока радона с поверхности грунта. Она определяется такими факторами, как повышенные концентрации урана и радия в горных породах и подземных водах, высокая проницаемость геологической среды, наличие движущих сил — градиентов концентрации, температуры, давления. Оценка потенциальной радоноопасности территорий позволяет превентив-

но снизить облучение населения радоном в новых зданиях, а также выявить потенциально опасные области без проведения длительных и дорогостоящих измерений радона в жилых помещениях.

Впервые карта радоноопасности России масштаба 1:10 000 000 была составлена в 1996 г. на основании геохимических данных и аэрогамма-съёмок, полученных в ходе работ по поискам урана. По мере накопления результатов измерений концентрации радона в домах появилась возможность составления карты распределения средних значений концентрации этого газа в зданиях по регионам. Карта была составлена в 2016 г. по данным Федерального банка доз облучения граждан России. Оказалось, что обе карты хорошо согласуются между собой. Регионы с наиболее высокими уровнями облучения радоном в домах в целом соответствуют наиболее потенциально радоноопасным территориям, выделенным по геолого-геохимическим признакам.

Некоторые несоответствия между потенциальной радоноопасностью и реальной концентрацией радона в домах обычно связаны с влиянием конкретной конструкции зданий. Например, в большинстве новых зданий с усиленной подземной частью и отдельными входами в подвалы, независимо от степени радоноопасности территории, радон практически не проникает из грунтов основания в помещения. Напротив, в старых зданиях при определённом режиме вентиляции может действовать своего рода насос, “подсасывающий” воздух из грунтового основания, что приводит к повышенным концентрациям радона в таких домах.

Для практических целей очень важна детальная информация о потенциальной радоноопасности территорий населённых пунктов. Однако методология и принципы детального картирования потенциальной радоноопасности в крупном масштабе пока недостаточно разработаны. Причины — отсутствие

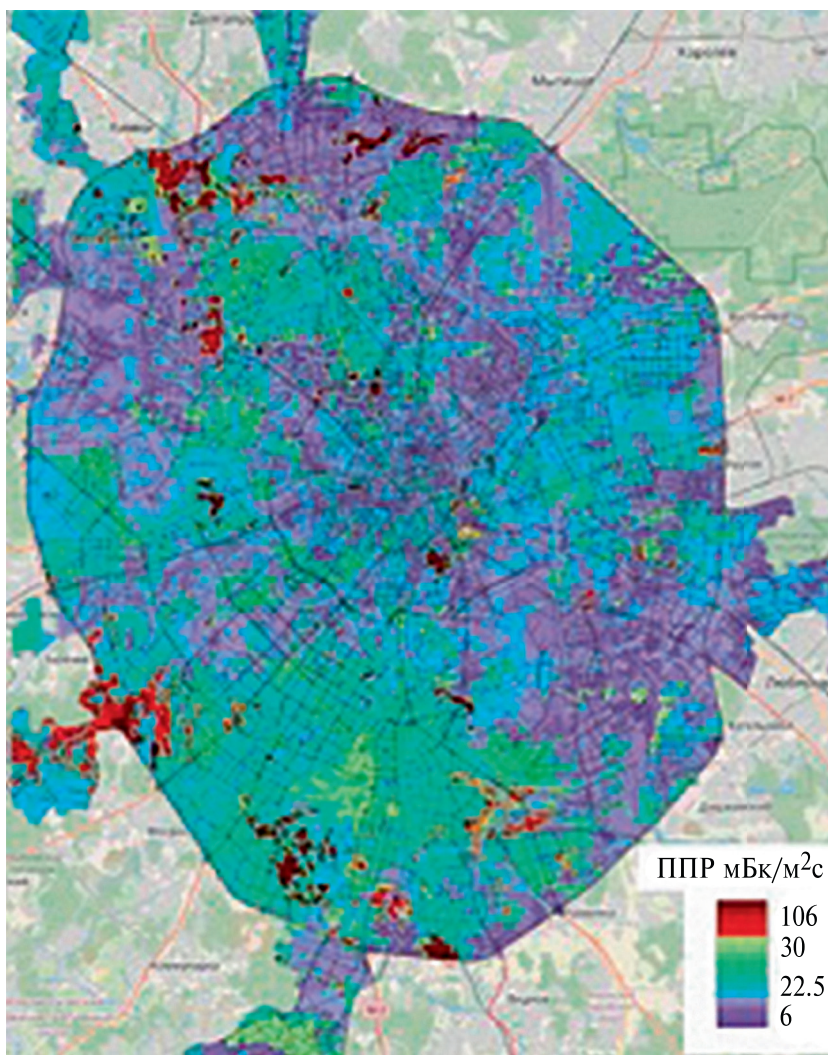


Рис. 9. Карта плотности потока радона на территории Москвы
Источник: [12].

необходимого объёма фактических данных и научно обоснованной методологии такого картирования.

ИГЭ РАН проводит исследования в этом направлении. В настоящее время для построения карт потенциальной радоноопасности территорий перспективно применение методов машинного обучения. На рисунке 9 представлен пример картирования потенциальной радоноопасности территории Москвы. При построении карты использовались материалы тематического крупномасштабного геологического картирования территории города, выполненного институтом ранее. Алгоритмы машинного обучения позволили получить достаточно детальные карты радоноопасности с учётом особенностей геологического строения территории.

В Москве низкие значения плотности потока радона соответствуют в основном долинам рек, сложенным слаборадиоактивными песчаными грунтами; более высокие значения потоков радона характерны для водоразделов, сложенных суглинками, содержащими большие концентрации урана и радия. Локальные участки с максимальными значениями плотности потока радона связаны, по-видимому, с формированием конвективных газовых потоков в зонах повышенной проницаемости за счёт перепада температур между грунтовым массивом и атмосферой. Природа этих зон повышенной проницаемости может быть разной, связанной как с геодинамически активными зонами, так и с высокопроницаемыми отложениями или с развитием суффозии вдоль подземных коммуникаций.

Во всех случаях проявления геологических рисков наиболее важной, но и самой сложной для решения оказывается прогнозная задача развития опасного процесса. Её решение подразумевает некоторую временную экстраполяцию, надёжность которой определяется полнотой изучения причин и закономерностей развития процесса. Прогноз может быть общим или локальным.

Общий прогноз, по существу, характеризует степень опасности развития неблагоприятного процесса или сочетания таких процессов на определённой территории и возможные последствия возникающих явлений. Строго говоря, такая оценка вариаций опасности во времени должна быть вероятностной. Однако невозможность одновременного учёта всех факторов развития всех идущих на конкретной территории процессов приводит к упрощению — использованию на практике неких условных, можно сказать экспертно-аналитических, интегральных характеристик (например, баллов), описывающих интенсивность их установленных проявлений — поражённость площади оползнями или карстовыми провалами, их размеры, среднее возможное количество новых проявлений в единицу времени и т.п.

Последствия процессов одинаковой интенсивности могут быть различными для территорий

с разной функциональной организацией, плотностью населения, типом существующих инженерных сооружений или угодий и другими особенностями. Они могут быть оценены через возможный ущерб, количественно характеризуемый экономическими, социальными, медицинскими или другими параметрами. Этот ущерб, следовательно, выступает оценкой уязвимости данной территории к рассматриваемому процессу или совокупности процессов.

Совместный учёт опасности природных процессов и уязвимости по отношению к ним некоторой территории позволяет перейти к оценке риска развития этих процессов. Этот риск является функцией вероятности природных опасностей, которые возможны на рассматриваемой территории, и уязвимости элементов риска, под которыми подразумевается всё, к чему применимо понятие ущерба.

В такой постановке общий прогноз опасных процессов на некоторой территории может быть дан в площадной оценке — в виде карт риска. В ИГЭ РАН разработан подход к картографированию природных рисков, которое позволяет выражать в единых количественных показателях фактическую и прогнозную информацию об опасностях любого генезиса и их последствиях для принятия научно обоснованных решений по повышению безопасности. Для этого карта опасности, например, оползневой, совмещается с картой уязвимости (плотность населения, типизация застройки, сельхозугодья и т.д.) с получением интегральной характеристики риска наступления того или иного ущерба. Этот риск в дальнейшем можно актуализировать и переоценивать с учётом новых данных по изменению суммы баллов опасности и категории риска в их пределах.

Локальный же прогноз всегда направлен на конкретный объект, явление или группу явлений в пределах существенно меньшей территории и подразумевает расчёт некоего параметра, характеризующего устойчивость массива грунтов. Это может быть коэффициент запаса устойчивости пород при склонного массива, предельный размер возможного провала, глубина оттаивания и т.д., для чего применяется некая расчётная модель. Успех прогноза зависит от качества этой модели и достоверности введённых в неё — обычно экспериментальных — параметров. Такой расчёт, в свою очередь, может быть вероятностным или детерминированным. В последнем случае для минимизации числа возможных следствий очевидным или неочевидным образом пренебрегают вариативностью причин, вызывающих опасный процесс. В вероятностном варианте с помощью обычного перебора рассматривается большее количество возможных сочетаний действующих факторов. При этом, к сожалению, нельзя утверждать, что это повышает надёжность расчётов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зеркаль О.В., Махинов А.Н., Кудымов А.В. и др.* Бу-реинский оползень 11 декабря 2018 г. Условия формирования и особенности механизма развития // Геориск. 2019. Т. XII. № 4. С. 46–58.
Zerkal O.V., Makhinov A.N., Kudymov A.V. et al. Bureya landslide 11 December 2018. Conditions of formation and features of the development mechanism // Georisk. 2019, vol. XII, no. 4, pp. 46–58.
2. *Фоменко И.К.* Современные тенденции в расчётах устойчивости склонов // Инженерная геология. 2012. № 6. С. 44–53.
Fomenko I.K. Modern tendencies in calculations of slope stability // Engineering Geology. 2012, no. 6, pp. 44–53.
3. *Аманова Г.С., Вознесенский Е.А.* Инженерно-геологическое моделирование пространственной неоднородности грунтов // Грунтоведение. 2023. № 2. С. 13–28.
Amanova G.S., Voznesensky E.A. Engineering-geological modelling of spatial heterogeneity in soils // Gruntovedenie. 2023, no. 2, pp. 13–28.
4. *Сергеев Д.О., Перльштейн Г.З., Мерзляков В.П. и др.* Геоэкологические риски функционирования ведущих природно-технических комплексов на территории криолитозоны России // Вопросы географии. Сб. 142: География полярных регионов / Отв. ред. В.М. Котляков. М.: Издательский дом “Кодекс”, 2016. С. 57–75.
Sergeev D.O., Perlstein G.Z., Merzlyakov V.P. et al. Geoeological risks of functioning of the leading natural-technical complexes on the territory of the Russian cryolithozone // Voprosy geografii. Coll. 142: Geography of polar regions / Ed. by V.M. Kotlyakov. M.: Publishing House “Codex”, 2016, pp. 57–75.
5. *Sergeev D., Chesnokova I., Morozova A.* Estimation of the Past and Future Infrastructure Damage Due the Permafrost Evolution Processes // AGU Proceedings. San Francisco, 2015.
6. *Микляев П.С., Сергеев Д.О., Карпенко Ф.С. и др.* Разработка методики инженерно-геокриологического мониторинга состояния автомобильных дорог в криолитозоне // Материалы XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставки “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”, Москва, 28 ноября–2 декабря 2022 г. М.: ООО “Геомаркетинг”, 2022. С. 228–233.
Miklyaev P.S., Sergeev D.O., Karpenko F.S. et al. Development of the methodology of engineering-geocryological monitoring of the state of highways in the cryolithozone // Proceedings of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition “Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation”, Moscow, 28 November–2 December 2022. M.: LLC “Geomarketing”, 2022, pp. 228–233.
7. Методические рекомендации по организации инженерно-геокриологического мониторинга и оборудованию инженерно-геокриологических стационарных мониторинговых постов в полосе отвода автодорог в криолитозоне. ОДМ 218.11.007-2023. Росавтодор, 2023.
Methodological recommendations on organisation of engineering-geocryological monitoring and equipping of engineering-geocryological stationary monitoring posts in the road right-of-way in the cryolithozone. ODM 218.11.007-2023. Rosavtodor, 2023.
8. *Сергеев Д.О., Перльштейн Г.З., Хименков А.Н. и др.* Аэровизуальные обследования для оценки опасности экзогенных геологических процессов на трассе магистрального нефтепровода (гл. 13) // Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность средств хранения и транспорта энерго-ресурсов. М.: МГОФ “Знание”, 2019. С. 295–309.
Sergeev D.O., Perlstein G.Z., Khimenkov A.N. et al. Aerial Visual Surveys for Hazard Assessment of Exogenous Geological Processes on the Trunk Oil Pipeline Route (Chapter 13) // Security of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Safety of means of storage and transport of energy resources. M.: MGOF “Znanie”, 2019, pp. 295–309.
9. *Osipov V., Aksyutin O., Sergeev D. et al.* Using the Data of Geocryological Monitoring and Geocryological Forecast for Risk Assessment and Adaptation to Climate Change // Energies. 2022, vol. 15, no. 3, article number 879.
10. Национальный атлас России. Т. 2. Карстовые пещеры. <https://nationalatlas.ru/>
National atlas of Russia. V.2. Karst caves. <https://nationalatlas.ru/>
11. *Кочев А.Д.* Региональные особенности изучения и оценки опасности карстового и связанных с ним процессов // Сергеевские чтения. Региональная инженерная геология и геоэкология. Вып. 25. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (28–29 марта 2024 г.). М.: Геоинфо, 2024. С. 66–70.
Kochev A.D. Regional peculiarities of studying and assessing the danger of karst and related processes / Sergeev Readings. Regional Engineering Geology and Geoecology. Iss. 25. Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology (28–29 March 2024). M.: Geoinfo, 2024, pp. 66–70.
12. *Gavriliev S., Petrova T., Miklyaev P., Karfidova E.* Predicting radon flux density from soil surface using machine learning and GIS data // Science of The Total Environment. 2023, vol. 903, article number 166348.

GEOLOGICAL HAZARDS ON THE TERRITORY OF RUSSIA: THEIR DISTRIBUTION AND DEVELOPMENT PREDICTION

E.A. Voznesensky^{a,b,*}

^aSergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**E-mail: eugene@geoenv.ru*

The article deals with the regularities of distribution of manifestations of dangerous geological processes on the territory of Russia and the issues of their reliable forecast. It is demonstrated that local forecast of dangerous processes development is always directed to a specific object, phenomenon or group of phenomena within limited territories and implies the calculation of some parameter characterizing the stability of the soil massif, for which a certain calculation model is necessarily applied. And the success of the forecast depends on the quality of this model and the reliability of the experimental parameters entered into it. In deterministic calculation, the variability of causes causing the process is obviously or unobviously neglected in order to minimize the number of possible consequences. In the probabilistic variant, more possible combinations of acting factors are usually considered by enumeration. Unfortunately, it cannot be claimed that this increases the reliability of calculations, since the key point is the quality of the calculation model used and the consideration of the heterogeneity of the environment.

Keywords: hazardous processes, landslide, karst, geocryological hazards, radon, geological risk, forecast, model.

ТЕХНИЧЕСКИЕ, АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ

© 2024 г. А.И. Зайцев^{a,*}, Г.И. Долгих^{b,**}, С.Г. Долгих^{b,***}, Е.Н. Пелиновский^{c,****}

^aСпециальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия

^bТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия

^cИнститут прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: aizaytsev@mail.ru

**E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

***E-mail: sdolgikh@poi.dvo.ru

****E-mail: pelinovsky@ipfran.ru

Поступила в редакцию 06.06.2024 г.

После доработки 28.06.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

В статье представлены измерительные системы, которые используются для мониторинга природных процессов в южной части Охотского моря. Архитектура приборов позволяет организовать регистрацию измерений и передачу данных о волнах (в том числе аномально больших) в режиме реального времени. Впервые в этом регионе организованы наблюдения за ледовой обстановкой с помощью радиолокационной станции. Исследования проводятся научным стационаром “мыс Свободный”, где установлены лазерно-интерференционные приборы для регистрации вариаций колебаний и волн в геосферах. При обработке натуральных данных были обнаружены деформационные аномалии, характерные для цунамигенных землетрясений, изучены закономерности трансформации колебаний и волн различных периодов при переходе из одной геосферы в другую.

Ключевые слова: морские поверхностные волны, аномальные волны, цунами, лазерный деформограф, Охотское море, лёд в море, радиолокационная станция.

DOI: 10.31857/S0869587324080071, EDN: FCLDKZ

Инструментальные наблюдения поверхностных волн в Охотском море направлены на обеспечение безопасности работы прибрежной инфраструктуры, включающей порты, буровые установки и нефтяные платформы по добыче нефти и газа в шельфовой зоне. Развитие экономики Дальнего Востока диктует жёсткие требования к качеству оперативной и статистической информации о волновых режимах в исследуемых регионах, что невозможно без длительных высокоточных наблюдений, численного моделирования и развития систем мониторинга. Имеющиеся в распоряжении Специального кон-

структорского бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ) ДВО РАН приборы отвечают международным стандартам, а его специалисты обладают большим опытом проведения экспериментальных исследований и обработки получаемых данных с использованием современных методов и физической интерпретации результатов. В состав СКБ САМИ ДВО РАН входят научные и конструкторские подразделения, опытно-экспериментальное производство, а также гидрофизические стационары на побережьях о. Итуруп и о. Сахалин (мыс Свободный, озеро Птичьё). Это

ЗАЙЦЕВ Андрей Иванович – член-корреспондент РАН, директор СКБ САМИ ДВО РАН. ДОЛГИХ Григорий Иванович – академик РАН, директор ТОИ ДВО РАН. ДОЛГИХ Станислав Григорьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ТОИ ДВО РАН. ПЕЛИНОВСКИЙ Ефим Наумович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ИПФ РАН.

позволяет осуществлять полный комплекс морских научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, включая изготовление и испытание новых образцов специальной морской техники и автоматизированных систем сбора телеметрической информации о состоянии моря и атмосферы.

СКБ САМИ на протяжении многих лет ведёт экспериментальные исследования волновых процессов в Охотском море. В них принимает участие Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, в котором разработан ряд приборов для мониторинга основных параметров геосфер на основе современных лазерно-интерференционных методов. В первую очередь, к ним относятся лазерные деформографы различной длины и ориентации, лазерные нанобарографы, лазерные измерители вариаций давления гидросферы и лазерные гидрофоны. С их помощью регистрируются вариации микродеформаций верхнего слоя земной коры, давления атмосферы и гидросферы в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью на уровне фоновых колебаний. Все лазерно-интерференционные приборы установлены на полигоне СКБ САМИ на мысе Свободный (о. Сахалин). Они позволяют вести измерения одновременно во всех геосферах, что открывает возможности комплексного изучения процессов и их происхождения, регистрации волновых процессов на стадии зарождения, оценки энергии, передаваемой из одной геосферы в другую, исследования трансформации волн между геосферами. Описание существующих измерительных комплексов и некоторых результатов, полученных с их помощью, представлено ниже.

Лазерно-интерференционный комплекс на мысе Свободный. Создание лазерно-интерференционного комплекса в южной части о. Сахалин началась

в 2010 г. с разработки мобильного, а затем и стационарного горизонтального лазерного деформографа неравноплечего типа. Прибор создан на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона с длиной измерительного плеча 10,5 м и ориентацией “север–юг”. Лазерный деформограф позволяет регистрировать вариации микродеформаций верхнего слоя земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 0,3 нм [1]. С целью исключения влияния температурных вариаций на показания прибора он размещён в подземном термоизолированном помещении на глубине около 2 м. В 2012 г. к лазерному деформографу были добавлены лазерный нанобарограф для измерения вариаций атмосферного давления и лазерный гидрофон для измерения вариаций давления гидросферы, а впоследствии и метеостанция для измерения основных метеопараметров. Все эти измерительные системы представлены на рисунке 1. Лазерный нанобарограф создан также на основе равноплечего интерферометра Майкельсона, где в качестве чувствительного элемента используется блок анероидных коробок, что позволяет вести измерения в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа. Этот прибор тоже размещён в подземном термоизолированном помещении. Лазерный гидрофон, созданный на основе равноплечего интерферометра Майкельсона, регистрирует изменения давления гидросферы в том же частотном диапазоне с точностью 50 мкПа [2]. Метеостанция ведёт круглосуточное наблюдение за изменениями основных параметров атмосферы, таких как температура, влажность, атмосферное давление, направление и скорость ветра. Данные со всех приборов поступают по кабельным линиям в лабораторное помещение, где после предварительной обработки сохраняются в базе экспериментальных данных.

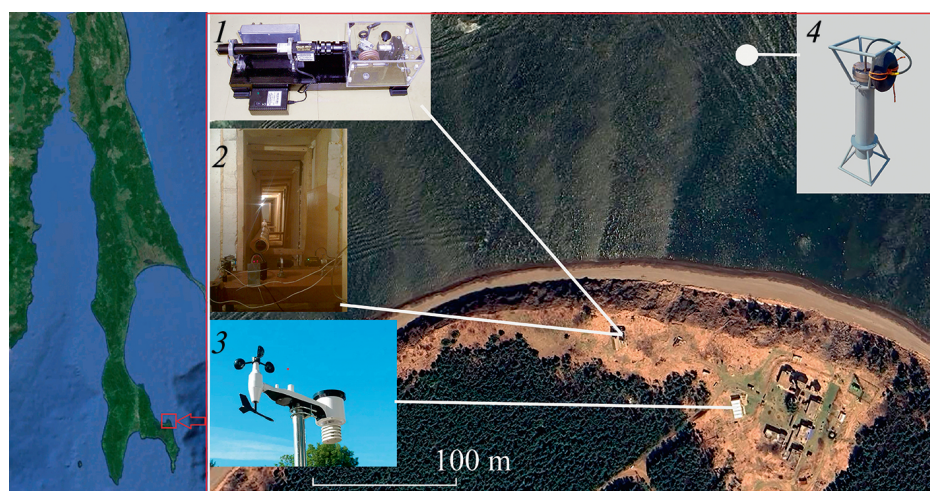


Рис. 1. Состав научного стационара “мыс Свободный”:

1 – лазерный нанобарограф; 2 – лазерный деформограф горизонтального типа; 3 – метеостанция; 4 – лазерный гидрофон

Задача лазерно-интерференционного комплекса — изучение наиболее энергоёмких процессов Земли, происходящих на границе раздела системы “атмосфера—гидросфера—литосфера”, часть которых носит катастрофический характер (штормы, цунами, землетрясения). Для исследования закономерностей возникновения и развития этих процессов необходима аппаратура, позволяющая измерять основные параметры геосфер на уровне фоновых колебаний в широком частотном диапазоне. С помощью этих комплексов изучены закономерности трансформации гидроакустических и сейсмоакустических сигналов на границе “вода—дно”, оценён вклад атмосферных процессов в уровень микродеформаций верхнего слоя земной коры, выявлены закономерности трансформации морского волнения в упругие колебания широкого диапазона частот. Благодаря применению лазерно-интерференционных приборов обнаружены такие природные явления, как “голос моря” при движении тропических циклонов и тайфунов (рис. 2) [3], деформационные аномалии, характерные для цунамигенных землетрясений [4, 5], метеоцунами и волны-убийцы [6] на записях лазерных измерителей вариаций давления гидросферы.

Измерительные станции наблюдений поверхностных волн в Охотском море. Учитывая российский [7–9] и мировой [10] опыт измерения поверхностных волн, конструкторами СКБ САМИ ДВО РАН разработан и испытан прибор “Волнограф” для измерения поверхностного волнения (рис. 3 а). Он фиксирует донное давление, которое пересчитывается в колебания морской поверхности. Станция имеет три канала регистрируемых параметров, независимый автономный источник питания, блоки электроники для усиления принимаемого сигнала и записи данных на энергонезависимую память, интерфейс управления и фиксирования времени.

Конструкция волнографа позволяет записывать колебания давления на глубинах до 100 м. Спек-

тральный состав гидродинамического давления зависит от глубины, на которой измеряют давление. С её увеличением поверхностные волны заметно затухают и максимум спектра смещается в сторону низких частот, то есть более длинных волн (измерения проводились в прибрежной зоне Сахалина и Курил).

Ещё один прибор для регистрации поверхностного волнения — выполненный в корпусе из нержавеющей стали автономный донный регистратор придонного давления АРВ-К12 (рис. 3 б), произведённый в КБ г. Углич Ярославской области и используемый в исследованиях СКБ САМИ. В качестве первичных преобразователей физических величин используются кварцевые резонаторы. Диапазон измерения давления на глубинах до 100 м, точность по давлению 0.06%, диапазон рабочих температур от -4 до 40°C , автономность работы донного регистратора составляет около 6 месяцев, дискретность измерений 1 сек. Эти приборы использовались для регистрации Симуширского цунами 2006 г., Невельского цунами 2007 г. [11, 12], а также для регистрации длинных волн на Курильских островах [13].

Для хранения и обработки полученных данных разработана и реализована система хранения гидрологических данных, позволяющая их структурировать и упорядочивать. Удобный доступ с помощью пользовательского интерфейса существенно упрощает работу с ними. Ещё одно преимущество системы состоит в том, что доступ к данным возможен с любого компьютера и из любой точки мира, при этом не требуется дополнительного программного обеспечения. Система позволяет пользователю получать данные с любой дискретностью в виде текстового файла с выбранными их рядами. Подобный подход предоставляет пользователю абсолютную свободу в выборе программного инструмента для дальнейшей работы.

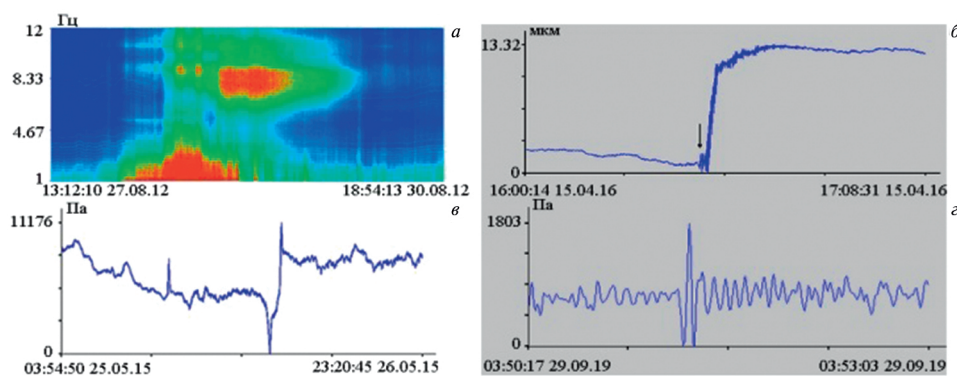


Рис. 2. Фрагменты записей и динамическая спектрограмма лазерно-интерференционных приборов: *а* — динамическая спектрограмма записи “голоса моря” лазерным деформографом; *б* — фрагмент записи лазерным деформографом деформационной аномалии; *в*, *г* — фрагменты записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы при формировании метеоцунами и волны-убийцы

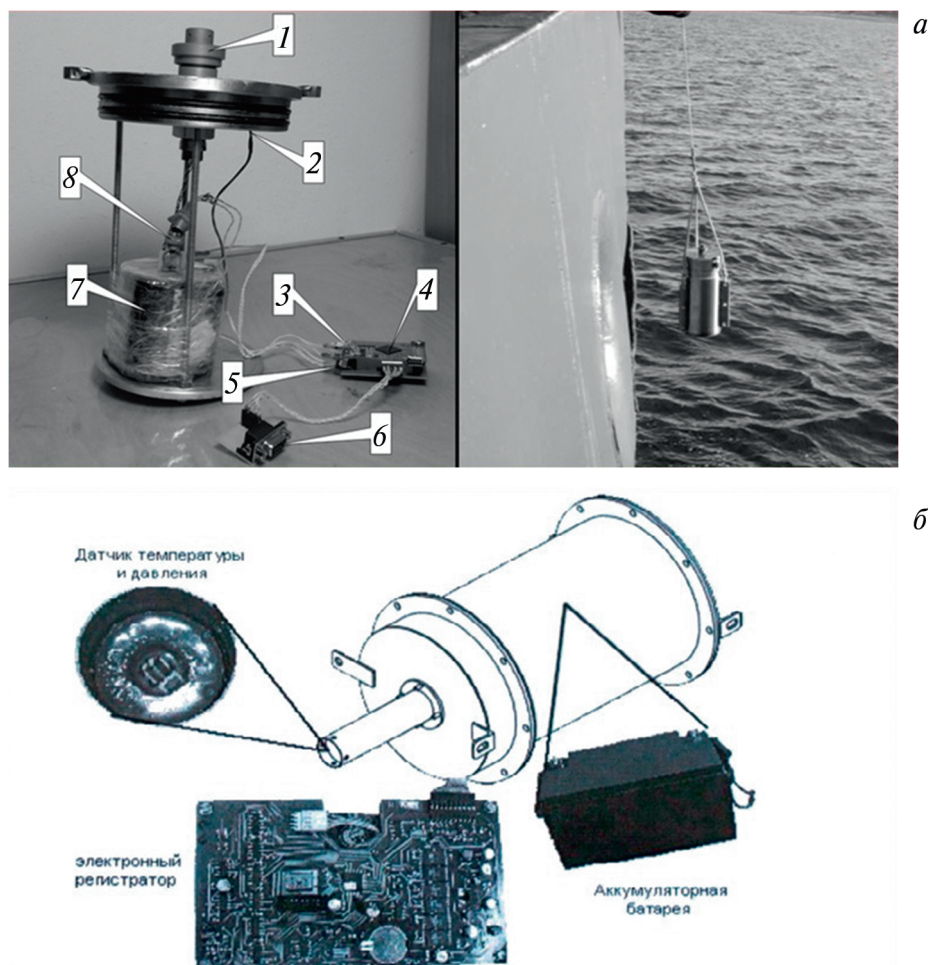


Рис. 3. Автономный регистратор поверхностного волнения “Волнограф” (а)

1 – канал гидростатического давления, 2 – канал температуры, 3 – энергонезависимая память (SD-карта), 4 – контроллер управления и сбора данных, 5 – блок электроники, 6 – COM порт со скоростью обмена 115 200 бод, 7 – литиевые батареи +3.2 В, 8 – разъём для включения станции в работу;

(б) автономный регистратор придонного давления (АРВ-К12), разработанный КБ г. Углич

Организация натурных наблюдений поверхностного волнения и мониторинг льда в прибрежной зоне о. Сахалин с помощью радиолокационной станции. В мае–июне 2016 г. на побережье о. Сахалин (станция “мыс Свободный”) были проведены испытания опытного образца автономного мобильного робототехнического комплекса (АМРК). В качестве района для проведения экспериментальных исследований с установленным комплектом оборудования выбрали береговую линию как район с большой перспективой использования. Важным аспектом при оценке возможностей движения АМРК по выбранному маршруту стал предварительный учёт данных о грунтовых поверхностях береговых линий (рис. 4). Используемое навигационное оборудование фирмы Orient Systems (OC-103) представляет собой GNSS-приёмник на базе двух плат ComNav K508, поставляемый в комплекте с антенной AT330. Приёмник снабжён ударопоглощающими резино-

выми бамперами, герметизированными портами, он пылевлагодонепроницаем.

Радиолокационная станция (РЛС) используется для измерения поверхностного морского волнения. Верификация натурных данных, полученных с её помощью, выполнялась с помощью автономного регистратора давления, а их интерпретация – с помощью метеорологического комплекса WXT500. Комплекс позволяет получить данные температуры, влажности, атмосферного давления, скорости и направления ветра. Благодаря сопоставлению основных метеорологических характеристик с данными РЛС и регистратора давления удалось получить достоверную информацию о поверхностном ветровом волнении [14, 15].

При ветровом волнении небольшой высоты на экране кругового обзора РЛС практически не наблюдаются эхосигналы, отражённые от морской поверхности. При сильном ветровом волнении ре-



Рис. 4. Фрагменты проведения экспериментальных исследований

гистрируются чёткие эхосигналы в виде ярко выраженных импульсов, соответствующих отдельным цугам волн. На рисунке 5 приведён пример работы РЛС во время трёхбалльного шторма. С левой стороны показан эхосигнал, справа — зависимость высоты волны от расстояния до регистратора. При анализе данных выяснилось, что значение отражённого радиосигнала падает с расстоянием вплоть до точки измерения: чем дальше от берега, тем высоты волн меньше, что согласуется с известными данными об усилении волн на мелководье. Волны большой высоты наблюдаются на расстоянии порядка 500 м от берега.

РЛС используется также с целью мониторинга и изучения дрейфа льда [16]. Для этого в зимне-весенний период в заливе Мордвинова на юго-восточном побережье о. Сахалин был проведён ряд экспериментов. Для интерпретации натуральных данных РЛС используется программно-аппаратный комплекс на базе процессора Sigma S6. РЛС в комплекте с этой системой часто применяются для наблюдения за ледовой обстановкой в непосредственной близости от места установки РЛС. Sigma S6 получает радиолокационный сигнал от РЛС, и за счёт

расширенных возможностей его обработки на базе встроенного специализированного программного обеспечения (фильтрация, подавление шумов и т.д.) значительно повышается достоверность и качество получаемой информации. Пример работы комплекса представлен на рисунке 6. Получена информация о скорости и направлении движения льда, характерном размере льдин [16]. Судя по данным измерений, наблюдается характерное движение в юго-восточном направлении, что подтверждает генеральное направление течений в данном регионе со средней скоростью 5 см/с. По натурным данным высоты торосов на дрейфующем льду их средняя величина возрастает от 0.5 до 1.3 м. Максимальная высота в январе — 1.5 м, в апреле — 5.0 м.

Регистрация штормов и аномально больших волн вблизи южного побережья о. Сахалин. Измерительными станциями гидростатического давления проводятся непрерывные измерения поверхностного волнения в районе научного стационара “мыс Свободный”. Для контроля методики обработки этих данных, было проведено сравнение с данными спутниковой альтиметрии, обновляемыми в режиме реального времени в открытом доступе [17].

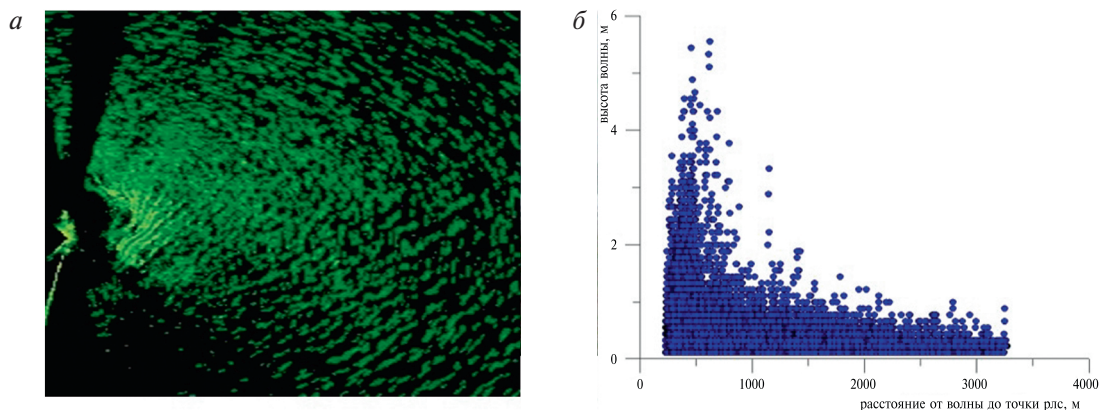


Рис. 5. Фиксация волнения в Охотском море во время трёхбалльного шторма (а), зависимость высоты волны от расстояния до точки постановки РЛС (б)

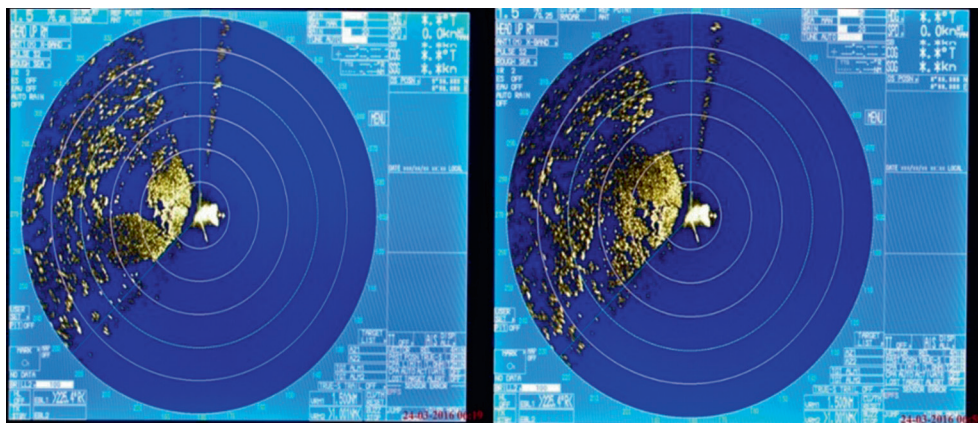


Рис. 6. Вид монитора РЛС после обработки радар-процессором

На рисунке 7 представлены графики значительной высоты волн, полученные с помощью спутниковой альтиметрии и в наших измерениях.

В соответствии с нашей методикой [18], процедуру предварительной коррекции прошли все анализируемые в работе записи. Нами разработан программный комплекс, состоящий из набора вычислительных программ, реализованных в C++, и скриптов на языке Matlab для отображения и анализа результатов вычислений, особенно вычислений высот и периодов волн.

В соответствии с описанной выше методикой скорректированы данные, полученные в результате эксперимента в районе мыса Свободный с октября 2011 г. по май 2020 г. Измеренные данные уровня моря за 2011–2012 гг., рассчитанного по ним с учётом гидростатической поправки, отличаются от тех, которые получены при сравнительном анализе без её учёта.

Предварительный анализ колебаний обнаруживает множество сильных штормов в период наблюдений с ноября по декабрь 2011 г. Наиболее сильный

шторм отмечался в конце декабря – начале января с амплитудой ветрового волнения до 9 м. Рассчитанный по этим колебаниям график значительных высот волн (по нему также можно отметить высокую штормовую активность и связанные с этим относительно большие высоты волн) в целом характерен для данного региона.

Одна из интересных отличительных особенностей полученных записей состоит в том, что на них присутствуют участки, на которых датчик регистрировал волнение моря, покрытого льдом. Подобные эффекты отмечались и ранее [19], но для Охотского моря они получены впервые. Таким образом, у нас есть возможность отследить изменение различных характеристик (спектральных, статистических) волнения не только во время изменения режима волнения, но и при установлении ледового покрова. Для оценки изменения спектральных характеристик во времени по всей записи был построен текущий спектр. На записи удалось зарегистрировать два наиболее сильных шторма: 24 декабря 2011 г. и 5 января 2012 г. Во время этих событий заметно существенное усиление не только ветровых волн

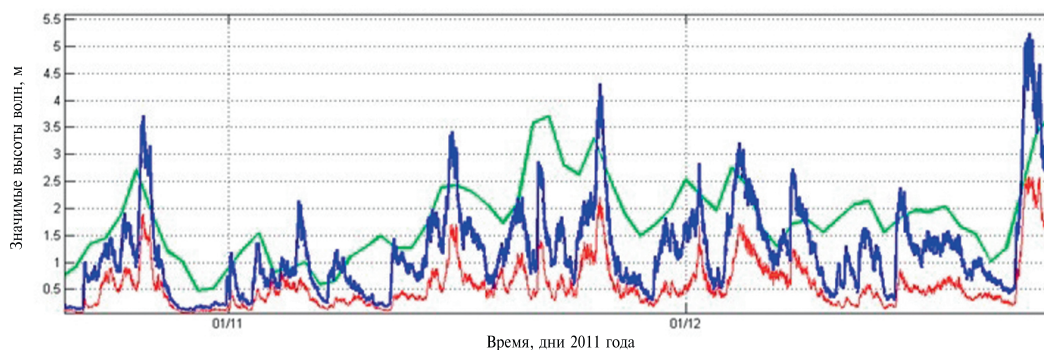


Рис. 7. Значительные высоты волн по натурным данным, полученным в районе мыса Свободный в 2011–2012 гг.; обработка данных с использованием гидростатической формулы (красная линия), с использованием частотной коррекции (синяя), данные спутниковой альтиметрии (зелёная линия)

Примечание: полноцветная версия рисунков к статье доступна в электронной версии “Вестника РАН”.

и волн зыби, но и энергии в области инфрагравитационных волн. Стоит особо отметить резкое изменение спектра волн после штормов. Так, 7 января 2012 г. энергия в области ветровых волн, высокочастотной и среднечастотной зыби резко падала, что, очевидно, связано с влиянием ледового покрова моря на волнение. Вероятно, лёд был подогнан к берегу сильными штормами. 22 и 29 января на спектре отмечались интересные усиления в области зыби (с периодами 15–18 сек.), зародившейся, по-видимому, ещё в Тихом океане, поскольку такие большие её периоды не характерны для зыби, образующейся в Охотском море.

В последнее время накопилось много свидетельств появления необычных волн на поверхности моря как в открытой части, так и вблизи берега (в литературе их называют волнами-убийцами). Некоторые натурные данные, и визуальные, и инструментальные, приводятся в опубликованных книгах, статьях и каталогах [20–23], теоретические модели волн-убийц развиваются в Институте прикладной физики РАН и других академических организациях. Основным признаком этих волн является их внезапно большая высота и крутизна [20]. На практике чаще всего пользуются амплитудным критерием выделения anomalно высоких волн:

$$H/H_s > 2, \quad (1)$$

где H – высота anomalно высокой волны, H_s – значительная высота волн.

Свидетельств наблюдений волн-убийц в морях, окружающих Россию, весьма немного. Нами выполнен поиск anomalно больших волн, так называемых волн-убийц, в прибрежной зоне Охотского моря. Измерения проводились в районе мысов Анива и Свободный в южной части острова Сахалин. Первые записи проявлений anomalно больших волн (волн-убийц) вблизи побережья Сахалина приведены в работе [24]. Там же содержатся свидетельства очевидцев. Всего на анализируемой записи за 70 дней наблюдения волнения в безлёдный период было выделено около 200 волн, подпадающих под определение амплитудного критерия (рис. 8). Согласно теории, основанной на представлении ветрового волнения узкополосным гауссовым случайным процессом [20], волны-убийцы в среднем встречаются раз в 10 ч в заданном месте (с превышением в 2 раза) так что наши оценки, основанные на анализе натурных данных, оказываются близкими к теоретическим.

Отметим первые данные наблюдений anomalно больших волн у оконечности мыса Анива на южном побережье острова Сахалин [24]. Они получены на основе анализа долговременных записей уровня моря за июнь–сентябрь 2009 г., зафиксированных с помощью донной станции (глубина постановки 12 м). За время наблюдений зарегистрировано 394 anomalно больших волн, высота которых

в 2 и более раза превышает значительную высоту волны. Из них 6 случаев, когда превышение достигает 2.5 раз. В этих шести событиях два раза волна-убийца имела вид одиночного гребня, в других случаях – знакопеременной волны или цуга волн. Частота наблюдения anomalно больших волн, в зависимости от их амплитуды, описывается пуассоновским распределением, как это и следует из теории экстремальной статистики. Волны-убийцы встречаются в этом районе в среднем дважды в день [25], что близко к оценке, которая следует из теории для узкополосного “гауссова” моря. Были приведены также данные наблюдений anomalно больших волн у оконечности мыса Свободный на южном побережье острова Сахалин. Они получены исходя из анализа долговременных записей уровня моря за ноябрь–май 2011–2012 гг., зафиксированных донной станцией (глубина постановки 16 м). По крайней мере, две anomalно большие волны (до 6 м), зарегистрированные 24 и 25 декабря 2011 г., совпали во времени с движением циклона (рис. 9). Его характеристики приведены на сайте Российской метеорологической службы: “В течение нескольких дней на Охотском море сохраняется штормовая погода. Ветер северной четверти усиливался до 17–22 м/с, в порывах до 25 м/с; высота волн до 4 м. Виной всему стал циклон, который 16 декабря приблизился к Камчатке. Сильный ветер охватил не только побережье Камчатки, но практически всю акваторию Охотского моря” [26]. Стоит отметить, что при прохождении этого циклона 18 декабря в центральной части Охотского моря в 200 км от Сахалина потерпела крушение плавучая буровая платформа “Кольская”.

Технические, аппаратные и программные решения для мониторинга и оповещения о цунами. Лазерно-интерференционные комплексы, расположенные в научных стационарах “мыс Свободный” (побережье Охотского моря) и “мыс Шульца” (побережье Японского моря) позволяют регистри-

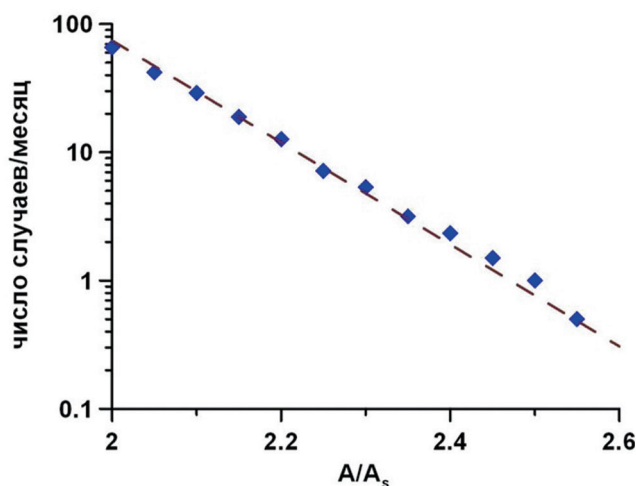


Рис. 8. Частота наблюдения волн-убийц в южной части Охотского моря

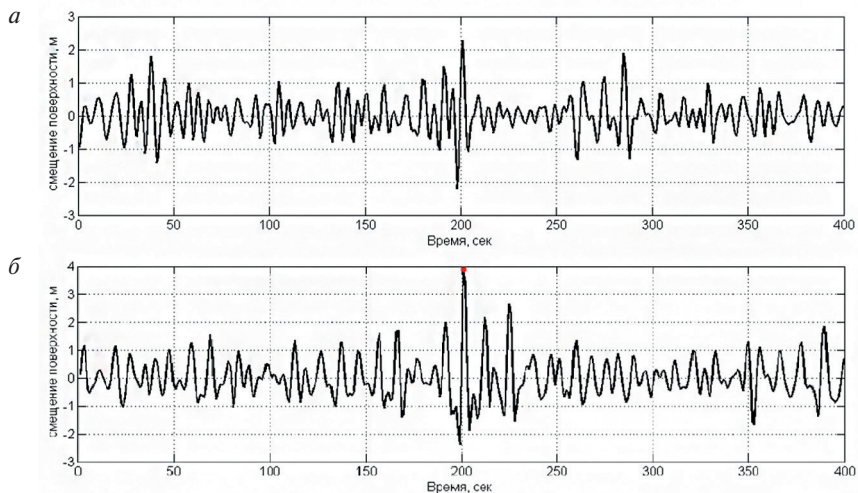


Рис. 9. Примеры аномально больших волн (волн-убийц), зарегистрированных у мыса Свободный:
а – 8 декабря 2011 г., высота 4.48 м ($H/H_s = 2.43$); *б* – 24 декабря 2011 г., высота 6.23 м ($H/H_s = 2.29$)

ровать цунами. Из-за физического свойства скорости движения волн по упругим поверхностям такой комплекс в основном делает это значительно быстрее, чем традиционная система раннего оповещения о цунами в Тихом океане, работа которой зависит от информации, поступающей с глубоководных станций DART [27].

25 марта 2020 г. сильное землетрясение с магнитудой 7.5 случилось вблизи острова Парамушир (Курильские острова). Оно вызвало слабое цунами на Камчатке и Курильских островах. Данные о регистрации землетрясения и цунами были записаны на трёх буях системы ДАРТ. Те же два события зарегистрировал лазерный деформограф, установленный

на морской экспериментальной базе ТОИ ДВО РАН “Мыс Шульца”, на расстоянии почти 2150 км от эпицентра (Японское море, вблизи г. Владивосток). Запись сигнала представлена на рисунке 10; она получена с помощью двух лазерных деформографов, один из которых ориентирован с запада на восток с длиной измерительного плеча 17.5 м (верхняя линия), а другой ориентирован с севера на юг с длиной 52.5 м (нижняя линия). По опыту регистрации предшествовавших землетрясений и цунами [4] уже через несколько минут после регистрации можно было говорить о возможной опасности цунами. Прибор зарегистрировал аномальные быстрые колебания спустя 15 мин. после землетрясения, что прибли-

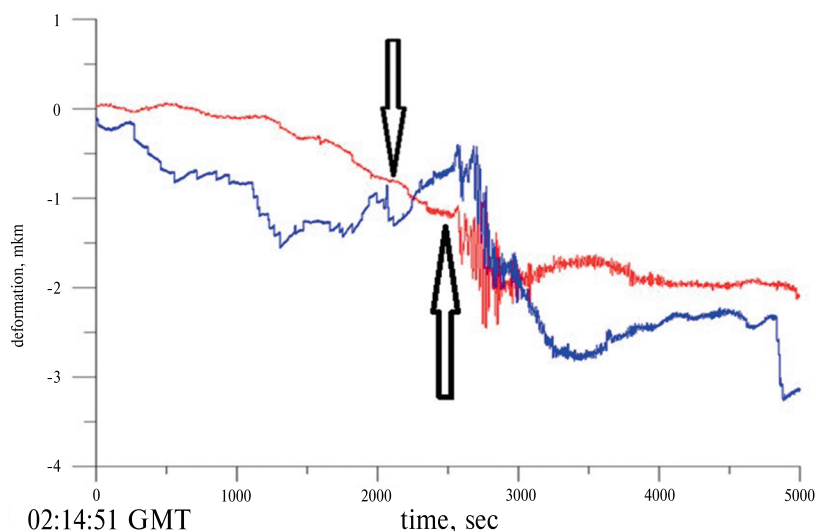


Рис. 10. Запись сигнала лазерных деформографов. Стрелкой вниз показано время землетрясения, стрелкой вверх – регистрация цунами

зительно на 30 мин. раньше, чем по информации от глубоководных станций DART.

Мы проанализировали инструментальные данные по регистрации землетрясения и цунами. В рамках теории мелкой воды, используя авторскую разработку [28], выполнено численное моделирование цунами 25 марта 2020 г. Сравнение с записями цунами на глубоководных станциях ДАРТ показало очень хорошее согласие. В то же время согласие с инструментальной записью события на юго-востоке Камчатки оказалось не очень хорошим, поскольку в это время на море бушевал шторм, и штормовые волны были сопоставимы с волнами цунами. Тем не менее приход первой волны цунами неплохо воспроизводится в численном моделировании.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-00121. <https://rscf.ru/project/22-17-00121/>

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dolgikh G.I.* Principles of the designing single-coordinate laser strainmeters // *Technical Physics Letters*. 2011, vol. 37(3), pp. 204–206.
2. *Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Plotnikov A.* Supersensitive Detector of Hydrosphere Pressure Variations // 2020, vol. 20(23), article number 6998. doi:10.3390/s20236998
3. *Dolgikh G.I., Chupin V.A., Gusev E.S., Timoshina G.A.* Cyclonic process of the “voice of the sea” microseism generation and its remote monitoring // *Remote Sens*. 2021, 13, 3452. <https://doi.org/10.3390/rs13173452>
4. *Dolgikh G., Dolgikh S.* Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origination // *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, vol. 9(10), article number 1144. <https://doi.org/10.3390/jmse9101144>
5. *Dolgikh G., Dolgikh S.* Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origins near the Japanese Islands // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, vol. 11(11), article number 2137. <https://doi.org/10.3390/jmse11112137>
6. *Dolgikh G., Dolgikh S., Chupin V. et al.* Registration of Nonlinear Hydrophysical Disturbances – Rogue Waves in Full-Scale Conditions // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, vol. 10(12), article number 1997. <https://doi.org/10.3390/jmse10121997>
7. *Кабатченко И.М., Косьян Р.Д., Красицкий В.П. и др.* Опыт эксплуатации волнографа-мареографа ВМ-04 // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 1. С. 150–155.
Kabatchenko I.M., Kos'yan R.D., Krasitskii V.P. et al. Operating experience with a ВМ-04 wave-tide gauge // *Oceanology*. 2007, vol. 47, no 1, pp. 135–140.
8. *Кузнецов К.И., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Ковалёв П.Д.* Особенности характеристик ветрового волнения у юго-восточного побережья о. Сахалин по измерениям придонного давления // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50. № 2. С. 242–250.
Kuznetsov K.I., Kovalev P.D., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N. Features of wind waves at the southeastern coast of Sakhalin according to bottom pressure measurements // *Izvestiya of the RAS. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014, vol. 50, no. 2, pp. 213–220.
9. *Лухнов А.О., Чернов А.Г., Куркин А.А., Полухина О.Е.* Проблемы создания аппаратно-программного комплекса для исследования гидродинамики шельфовой зоны // *Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова*. 2006. Т. 18. С. 120–123.
Lukhnov A.O., Chernov A.G., Kurkin A.A., Polukhina O.E. Problems of creating a hardware and software complex for studying the hydrodynamics of the shelf zone // *Proceedings of the Academy of Engineering Sciences named after A.M. Prokhorov*. 2006, vol. 18, pp. 120–123.
10. <https://www.aanderaa.com>
11. *Зайцев А.И., Ковалёв Д.П., Куркин А.А. и др.* Цунами на Сахалине 2 августа 2007 года: мареографные данные и численное моделирование // *Тихоокеанская геология*. 2009. Т. 28. № 5. С. 30–35.
Zaitsev A.I., Kurkin A.A., Chernov A.G. et al. The tsunami on Sakhalin on August 2, 2007: mareograph evidence and numerical simulation // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2009, vol. 3, no. 5, pp. 437–442.
12. *Зайцев А.И., Ковалёв Д.П., Куркин А.А. и др.* Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование // *Доклады академии наук*. 2008. Т. 421. № 2. С. 249–252.
Zaitsev A.I., Kurkin A.A., Chernov A.G. et al. The Nevelsk tsunamion August 2, 2007: Instrumental data numerical modeling // *Doklady Earth Sciences*. 2008, vol. 421, no. 1, pp. 867–870.
13. *Левин Б.В., Чернов А.Г., Шевченко Г.В. и др.* Первые результаты регистрации длинных волн в диапазоне периодов цунами в районе Курильской гряды на разнесенной сети станций // *Доклады Академии наук*. 2009. Т. 427. № 2. С. 239–244.
Levin B.V., Chernov A.G., Shevchenko G.V. et al. The first results of long wave registration in the range of tsunami periods in the region of Kuril ridge on a distributed station network // *Doklady Earth Sciences*. 2009, vol. 427, no. 1, pp. 874–879.
14. *Куркин А.А., Зезюлин Д.В., Макаров В.С. и др.* Исследования прибрежных районов Охотского моря с использованием наземного мобильного робота // *Экологические системы и приборы*. 2016. № 8. С. 11–17.
Kurkin A.A., Zezyulin D.V., Makarov V.S. et al. Studies of coastal areas of the Sea of Okhotsk using

- a land-based mobile robot // Ecological systems and devices. 2016, no. 8, pp. 11–17.
15. Zaytsev A., Zeziulin D., Belyakov V. et al. Coastal monitoring of the Okhotsk sea using an autonomous mobile robot. Science of Tsunami Hazards. 2017, vol. 36, no. 1, pp. 1–12.
 16. Аннелъ И.Л. Использование анализа данных наблюдений за дрейфом, ветром и барической обстановкой для определения сезонных изменений сил, действующих на ледяной покров // Проблемы Арктики и Антарктики. 1994. Вып. 67–68. С. 90–107.
Appel I.L. Using the analysis of observational data on drift, wind and atmospheric conditions to determine seasonal changes in forces acting on the ice sheet // Problems of the Arctic and Antarctic. 1994, Iss. 67–68, pp. 90–107.
 17. <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/wind-waves-products/index.html>
 18. Кузнецов К.И., Пелиновский Е.Н., Куркин А.А., Зайцев А.И. Восстановление поверхностных волн по измерениям вариаций давления на морском дне. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2013. № 3. С. 110–117.
Kuznetsov K.I., Pelinovsky E.N., Kurkin A.A., Zaitsev A.I. Restoration of surface waves from measurements of pressure variations on the seabed. // Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences. 2013, no. 3, pp. 110–117.
 19. Fessel D., Marko J., Melling H. Wave measurements using upward looking in marginal and polar sea ice regimes // ASL Environmental sciences. 2002 <http://www.aslenv.com/reports/ASL%20Intl%20Waves%20Workshop.pdf>
 20. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Нижний Новгород: НГТУ, 2004.
Kurkin A.A., Pelinovsky E.N. Freak waves: facts, theory and modeling. Nizhny Novgorod: NSTU, 2004.
 21. Kharif C., Pelinovsky E. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon // European J Mechanics - B/Fluid. 2003, vol. 22, no. 6, pp. 603–634.
 22. Kharif Ch., Pelinovsky E., Slunyaev A. Rogue Waves in the Ocean. Springer Link, 2009.
 23. Slunyaev A., Didenkulova I., Pelinovsky E. Rogue waters. // Contemporary Physics. 2011, vol. 52, no. 6, pp. 571–590.
 24. Зайцев А.И., Малащенко А.Е., Пелиновский Е.Н. Аномально большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. № 4. С. 35–42.
Zaitsev A.I., Malashenko A.E., Pelinovsky E.N. Abnormally large waves near the southern coast of O. Sakhalin. // Fundamental and applied hydrophysics. 2011, vol. 4, no. 4, pp. 35–42.
 25. Слюняев А.В., Кокорина А.В., Зайцев А.И. и др. Зависимость вероятностных распределения высот волн от физических параметров по результатам измерений у острова Сахалин. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16. № 3. С. 18–29.
Slunyaev A.V., Kokorina A.V., Zaitsev A.I. et al. Dependence of probabilistic distribution of wave heights on physical parameters based on measurement results near Sakhalin Island. // Fundamental and applied hydrophysics. 2023, vol. 16, no. 3, pp. 18–29.
 26. <http://sakhmeteo.ru/>
 27. <https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/>
 28. Zaytsev A., Kurkin A., Pelinovsky E., Yalciner A.C. Numerical tsunami model NAMI-DANCE Science of Tsunami Hazards. 2019. Т. 38. № 4. С. 151–168.

TECHNICAL, HARDWARE AND SOFTWARE SOLUTIONS FOR MONITORING NATURAL PROCESSES IN THE SOUTHERN PART OF THE SEA OF OKHOTSK

A.I. Zaytsev^{a,*}, G.I. Dolgikh^{b,**}, S.G Dolgikh^{b,***}, E.N. Pelinovsky^{c,****}

^a*Special Research Bureau of Automation of Marine Research FEB RAS,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

^b*Pacific Oceanological Institute n.a. V.I. Ilyichev FEB RAS, Vladivostok, Russia*

^c*Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhniy Novgorod, Russia*

*E-mail: aizaytsev@mail.ru

**E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

***E-mail: sdolgikh@poi.dvo.ru

****E-mail: pelinovsky@ipfran.ru

This paper presents measuring systems that are used to monitor natural processes in the southern part of the Sea of Okhotsk. The research is carried out at the scientific hospital "Svobodny Cape". The architecture of the devices is presented, which makes it possible to organize the registration of measurements and the transmission of wave data in real time. The results of recording abnormally large waves are obtained. Also, for the first time in this region, work was carried out to monitor the ice situation using radar. Laser interference devices have been installed at the Svobodny Cape scientific hospital to register variations of vibrations and waves flowing in geospheres. During the processing of full-scale data from laser interference devices, deformation anomalies characteristic of tsunamigenic earthquakes were detected, and patterns of transformation of vibrations and waves of different periods during the transition from one geosphere to another were studied.

Keywords: marine surface waves, laser deformograph, freak waves, tsunami Sea of Okhotsk, ice in the sea, radar station.

НАГРАДЫ И ПРЕМИИ

ЗОЛОТАЯ МЕДАЛЬ ИМЕНИ В.Р. ВИЛЬЯМСА 2023 ГОДА – В.К. ДРИДИГЕРУ



Президиум РАН присудил золотую медаль им. В.Р. Вильямса 2023 года доктору сельскохозяйственных наук Виктору Корнеевичу Дридигеру (Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр) за цикл работ по почвозащитному ресурсосберегающему земледелию и совершенствованию технологий возделывания кормовых культур.

Сферу научных интересов автора составляет совершенствование системы земледелия

и кормопроизводства. Проведены многолетние научные исследования по разработке принципиально новых ресурсосберегающих технологий возделывания сельскохозяйственных культур без обработки почвы, которые обеспечивают увеличение урожайности, экономическую эффективность растениеводства, плодородие почв, а также защиту от дефляции и водной эрозии. Усовершенствованы технологии возделывания кормовых культур, широко используемые на сельхозпредприятиях Ставропольского края, и сырьевые конвейеры по производству зелёных, грубых и сочных кормов, на основе которых создана единственная в стране региональная «Концепция развития кормопроизводства в Ставропольском крае».

ЗОЛОТАЯ МЕДАЛЬ ИМЕНИ А.М. ПРОХОРОВА 2023 ГОДА – А.М. СЕРГЕЕВУ



Президиум РАН присудил золотую медаль им. А.М. Прохорова 2023 года академику РАН Александру Михайловичу Сергееву по совокупности работ, опубликованных за 1977–2023 гг.

А.М. Сергеев внёс существенный вклад в развитие современной физики. Его труды охватывают теорию нелинейного взаимодействия оптических полей сверхкороткой длительности с веществом. Создан подход к описанию работы фемтосекундных лазеров на основе теории диссипативных оптических солитонов и предсказаны новые режимы лазерной генерации. Изучены такие нелинейно-волновые эффекты при распространении мощных фемтосекундных импульсов в веществе, как самоканалирование излучения

в присутствии ионизационной нелинейности и сильное адиабатическое повышение несущей частоты и частоты гармоник излучения. Предложены и обоснованы концепция генерации когерентного излучения аттосекундной длительности при ионизации атомов мощными фемтосекундными оптическими импульсами, а также новые методы ускорения заряженных частиц сверхмощными лазерными импульсами. Разработаны основы описания процессов в сверхсильных полях, сопровождающихся лавинообразным рождением электрон-позитронных пар. Под руководством А.М. Сергеева в ФИЦ «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН» организован Центр фемтосекундной оптики. Проведены фундаментальные эксперименты по физике сверхсильных полей. А.М. Сергеев – один из участников международного проекта лазерного интерферометра LIGO, впервые в истории зарегистрировавшего гравитационные волны.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ Н.Д. ЗЕЛИНСКОГО 2023 ГОДА –
М.В. АЛФИМОВУ, С.П. ГРОМОВУ И Л.Г. КУЗЬМИНОЙ

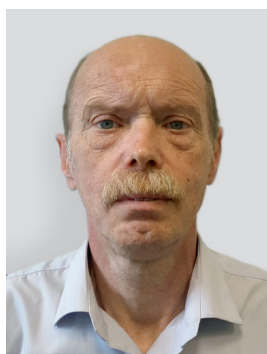


Президиум РАН присудил премию им. Н.Д. Зелинского 2023 года академику РАН Михаилу Владимировичу Алфимову, члену-корреспонденту РАН Сергею Пантелеймоновичу Громову и доктору химических наук Людмиле Георгиевне Кузьминой (Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН) за цикл работ “Кристаллографический подход к топохимическим реакциям [2+2]-фотоциклоприсоединения неопределённых соединений с сохранением монокристалла”.

Работы посвящены пионерским исследованиям твердофазных топохимических реакций [2+2]-фотоциклоприсоединения (ФЦП) неопределённых

соединений, протекающих как в твёрдом состоянии, так и в растворе. Авторы разработали различные приёмы (варьирование анионов, сокристаллизация с малыми органическими молекулами, введение конформационно гибких фрагментов), позволяющие создать такие кристаллические упаковки, в которых ФЦП-реакции можно провести в монокристаллическом состоянии без разрушения. Это открывает перспективы использования монокристаллов неопределённых соединений при разработке ячеек для оптической записи и хранения информации за счёт протекания прямой и обратной фотохимической реакции.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ П.П. АНОСОВА 2023 ГОДА –
С.Я. БЕЦОФЕНУ, Е.В. БЛИНОВУ И А.А. АШМАРИНУ



Президиум РАН присудил премию им. П.П. Аносова 2023 года доктору технических наук Сергею Яковлевичу Бецофену, доктору технических наук Евгению Викторовичу Блинову и кандидату технических наук Артёму Александровичу Ашмарину (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН) за серию работ “Разработка новых методов рентгеновской тензометрии градиентных материалов для оптимизации служебных характеристик покрытий, модифицированных поверхностных слоёв, высокоазотистых и ТРИП-сталей”.

Работы посвящены поиску принципиально новых методов рентгеновской тензометрии градиентных материалов, которые позволяют оптимизировать составы и технологии, обеспечивающие высокий уровень служебных характеристик высокоазотистых и ТРИП-сталей, теплозащитных покрытий на жаропрочных никелевых сплавах, износостойких покрытий и модифицированных поверхностных слоёв на сталях и титановых сплавах. Труды авторов составили методическую основу для обеспечения высокого уровня надёжности

и воспроизводимости служебных характеристик данного класса конструкционных материалов за счёт установления количественных корреляций между структурно-фазовыми показателями,

напряжённым состоянием и служебными свойствами материалов. Большинство полученных результатов опубликованы в международных высокорейтинговых журналах и защищены 15 патентами.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ Н.Н. МИКЛУХО-МАКЛАЯ 2023 ГОДА – Д.М. БОНДАРЕНКО



Президиум РАН присудил премию им. Н.Н. Миклухо-Маклая 2023 года члену-корреспонденту РАН Дмитрию Михайловичу Бондаренко за монографию “Постколониальные нации в историко-культурном контексте”.

Монография представляет собой фундаментальный масштабный труд, в котором разрабатываются историко-культурные основы сложения наций в разных цивилизациях. Показано, как формирование наций в постколониальных государствах Азии и Африки вписывается во

всемирно-исторических процесс, авторское понимание которого глубоко концептуально. В своём анализе Д.М. Бондаренко опирается на теорию множественных модернов Ш.Н. Айзенштадта, теорию осевого времени К. Ясперса и ряд других теорий, в которые вносит важные дополнения и уточнения. Работа во многом опирается на многочисленные собственные полевые исследования автора в различных странах Африки и представляет собой новаторскую попытку вписать процесс становления наций в постколониальных государствах Азии и Африки в общий поток всемирной истории, а также открывает новые перспективы изучения наций. Таким образом, монография вносит большой вклад как в африканистику, так и в историческую и антропологическую науку в целом.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ В.А. КОПТЮГА 2023 ГОДА – А.К. БУРЯКУ И О.А. ШПИГУНУ



Президиум РАН присудил премию им. В.А. Коптюга 2023 года членам-корреспондентам РАН Алексею Константиновичу Буряку и Олегу Алексеевичу Шпигуну за работу “Методы и средства для решения экологических проблем, вызываемых использованием жидкого ракетного горючего, суперэко-токсиканта – несимметричного диметилгидразина”.

В своей работе авторы решили важную экологическую проблему – снижение экологической нагрузки ракетно-космической отрасли на окружающую среду. Их исследования и прикладные разработки посвящены формированию комплекса методик аналитического контроля и технологии нейтрализации высокотоксичного несимметричного диметилгидразина (НДМГ), широко используемого в России и во многих других странах в качестве жидкого ракетного топлива. В практику аналитических лабораторий “Роскосмоса” внедрены 10 методик определения НДМГ и основных продуктов его трансформации, основанных на современных методах анализа. Методики прошли метрологическую аттестацию, включены в Госреестры РФ и РК и применяются для оценки загрязнения объектов окружающей среды компонентами жидкого ракетного топлива.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ А.А. ФРИДМАНА 2023 ГОДА – Д.В. ГАЛЬЦОВУ



Президиум РАН присудил премию им. А.А. Фридмана 2023 года доктору физико-математических наук Дмитрию Владимировичу Гальцову (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова) за цикл научных работ “Новые направления в теории гравитации и космологии”.

Цикл включает 25 наиболее известных и цитируемых статей автора, которые легли в основу ряда новых фундаментальных направлений в теории гравитации и космологии. Он состоит из трёх частей: “Развитие теории чёрных дыр”, “Поля Янга–Миллса в гравитации и космологии”, “Струнная гравитация”. Основные работы цикла по всем трём направлениям были пионерскими. Об их международном признании свидетельствует факт их многократного цитирования (более 2500 ссылок в рецензируемых научных журналах) и даже использование в научной литературе имени автора для обозначения соответствующих решений. Из первой части как с теоретической точки зрения,

так и для наблюдательной астрофизики (чёрные дыры и гравитационные волны от них) наиболее важными представляются статьи по движению релятивистских тел в сильном гравитационном поле с учётом реакции гравитационного излучения: пионерская статья 1982 г., а также работы 1980-х годов по теории чёрных дыр с магнитным полем вокруг них. Вторая часть содержит фундаментальное доказательство возможности существования “волос” (внешних полей) Янга–Миллса у чёрных дыр, что положило начало новому направлению в теории чёрных дыр. В третьей части цикла с помощью разработанного Д.В. Гальцовым метода (впоследствии получившего широкое распространение под названием “метод нильпотентных орбит”), а также трёхмерных сигма-моделей найдены многочисленные точные решения в теории гравитации со скалярными дилатонными и псевдоскалярными аксионными полями, которые содержатся в современных моделях супергравитации и теории суперструн. Хотя многие из работ Гальцов выполнил в соавторстве со своими учениками, а некоторые – совместно с российскими и зарубежными коллегами, ему везде принадлежит руководящая роль, включая постановку задачи и физическую интерпретацию результатов.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ В.А. ОБРУЧЕВА 2023 ГОДА –
К.Е. ДЕГТЯРЁВУ, Д.В. АЛЕКСЕЕВУ И А.А. ТРЕТЬЯКОВУ

Президиум РАН присудил премию им. В.А. Обручева 2023 года академику РАН Кириллу Евгеньевичу Дегтярёву, кандидату геолого-минералогических наук Дмитрию Викторовичу Алексеёву и кандидату геолого-минералогических наук Андрею Алексеёвичу Третьякову (Геологический институт РАН) за цикл работ “Геология и геодинамика докембрия и раннего палеозоя западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса”.

В работах представлены результаты многолетних исследований геологического строения, петро-геохимических характеристик докембрийских и нижнепалеозойских магматических, метаморфических

и осадочных комплексов Казахстана и Тянь-Шаня. Авторы внесли значительный вклад в понимание геодинамической эволюции западной части Центрально-Азиатского пояса в мезо-неопротерозое и раннем палеозое, заложили новый, тектонический, принцип для решения вопросов геодинамики и металлогенического районирования этого региона. Представленные в публикациях данные использовались при создании стратиграфических схем фанерозоя Казахстана 2022 г., а также могут служить основой для разработки легенд геологических карт нового поколения и при составлении палеогеографических и металлогенических карт.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ И.С. ШКЛОВСКОГО 2023 ГОДА –
А.В. ЗАСОВУ, О.К. СИЛЬЧЕНКО И А.В. МОИСЕЕВУ



Президиум РАН присудил премию им. И.С. Шкловского 2023 года доктору физико-математических наук Анатолию Владимировичу Засову, доктору физико-математических наук Ольге Касьяновне Сильченко (Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова) и доктору физико-математических наук Алексею Валерьевичу Моисееву (Специальная астрофизическая обсерватория РАН) за цикл работ “Приливные и аккреционные структуры в дисковых галактиках: динамика и звездообразование”.

Авторы получили уникальные сведения о кинематике, звёздном составе и радиальном градиенте металличности газа в 14 взаимодействующих галактиках различных типов. Установлены отличия процессов звездообразования во внутренних областях галактических дисков и в периферийных приливных структурах. Аккреция низкометаллического газа рассмотрена как фактор эволюции дисковых

галактик. Изучены объекты с разной кинематикой звёздного и газового компонентов, галактики с поллярными кольцами, составлен наиболее полный их каталог. Некоторые из объектов наблюдались на телескопе БТА-6, что позволило определить их металличность и ионизационное состояние, а также построить трёхмерное распределение массы тёмного гало. Сформирована концепция обогащения галактик низкометаллическим газом за счёт разрушения и поглощения маломассивных спутников. Анализ совокупности данных об аккреции низкометаллического межгалактического газа с различными кинематическими параметрами на дисковые, линзовидные и спиральные галактики позволил предложить оригинальную интерпретацию камертона Хаббла. Представленные исследования выполнены на основе богатого наблюдательного материала, собранного авторами на крупнейших российских и зарубежных телескопах оптического и радиодиапазонов, а также с помощью собственных инструментальных разработок.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ К.Э. ЦИОЛКОВСКОГО 2023 ГОДА – Л.М. ЗЕЛЁНОМУ



Президиум РАН присудил премию им. К.Э. Циолковского 2023 года академику РАН Льву Матвеевичу Зелёному за цикл работ, посвящённых подготовке и реализации проектов Федеральной космической программы России

1995–2023 гг. в области фундаментальных космических исследований.

Работы охватывают такие темы, как теория бесстолкновительной плазмы, пересоединение магнитных полей, динамика заряженных частиц, физика магнитосферы, планетные исследования, исследования по физике окологалактической плазмы (в том числе пылевой). Все труды автора получили широкую известность как в России, так и за рубежом.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ А.Г. СТОЛЕТОВА 2023 ГОДА – И.К. КАМИЛОВУ



Президиум РАН присудил премию им. А.Г. Столетова 2023 года члену-корреспонденту РАН Ибрагимхану Камиловичу Камиллову за цикл работ “Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах”.

Цикл содержит результаты фундаментальных исследований в области теплофизики конденсированных сред, квантовой теплофизики твёрдого тела и термодинамики, включая магнитотермодинамику. В частности, впервые в мировой практике представлены итоги комплексных исследований статических и динамических критических явлений в моделях сложных реальных ферро- и антиферромагнитных материалов, установлен характер и особенности критического поведения сложных моделей при одновременном учёте нескольких типов релятивистских взаимодействий. Для целого ряда конденсированных систем установлены классы универсальности, обнаружены новые физические

явления и эффекты (включая низкотемпературные фазовые переходы), разработаны и применены новые методы определения основных характеристик магнитоупорядоченных кристаллов, построены магнитные фазовые диаграммы. Экспериментально доказано существование магнитного твердотельного критического состояния. Благодаря И.К. Камиллову изучен новый класс полупроводников – квазибесщелевые полупроводники, а также особенности электронных фазовых переходов в них. Предложены альтернативные методы создания р–п-переходов в условиях большого градиента температур. Выдающиеся результаты получены в области неравновесных фазовых переходов в сильно нелинейных системах.

И.К. Камиллов – автор 8 монографий и более 260 научных статей (большинство из которых вошли в упомянутый цикл), опубликованных в отечественных и зарубежных академических изданиях. Учёный получил 32 патента и 17 авторских свидетельств. Фундаментальные работы Камиллова имеют прямое отношение к выдающимся трудам А.Г. Столетова в области изучения критического состояния жидкость–пар и спонтанно упорядоченных сред.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ А.В. ЧАЯНОВА 2023 ГОДА – М.Ю. КСЕНОФОНТОВУ



Президиум РАН присудил премию им. А.В. Чаянова 2023 года доктору экономических наук Михаилу Юрьевичу Ксенофонтову (Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН) за серию научных работ по использованию сценарного прогнозирования для обоснования приоритетов агропродовольственной политики Российской Федерации.

Актуальность работ М.Ю. Ксенофонтова обусловлена обострением глобальной продовольственной проблемы, усилением финансово-экономической нестабильности и рисков, необходимостью поиска эффективного ответа на новые вызовы, стоящие перед национальным агропродовольственным комплексом. Основные научные результаты его исследований состоят в развитии методологии и методики прогнозирования агропродовольственной сферы, повышении практической значимости прогнозов при разработке государственной аграрной политики и политики продовольственной безопасности России.

Новизна исследований состоит в реализации межотраслевого и междисциплинарного подходов при изучении аграрной проблематики и внедрении

её в план социально-экономического развития страны в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Особенности методологического подхода автора позволяют корректно сформулировать задачу выбора эффективного обеспечения продовольственной безопасности, выявить содержательные различия и сопряжённость политики продовольственной безопасности и агропродовольственной политики, проводить многоаспектный анализ разнонаправленных последствий экспортной экспансии и импортозамещения, технологических сдвигов и развития аграрного образования.

Учёный разработал и апробировал авторскую методику оценки потенциала роста аграрного производства, соответствующего разным сценариям эволюции рыночной конъюнктуры и агропродовольственной политики. На основе полученных результатов обоснована необходимость кардинального изменения целевых установок и системы инструментов агропродовольственной политики в России по мере приближения внутренних аграрных рынков к состоянию насыщения.

Значительным научным вкладом М.Ю. Ксенофонтова в развитие экономической науки служит создание понятийного аппарата, который успешно применён в исследованиях, касающихся политики развития аграрного производства и обеспечения продовольственной безопасности.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ С.О. МАКАРОВА 2023 ГОДА – М.А. ЛЕВИТАНУ



Президиум РАН присудил премию им. С.О. Макарова 2023 года доктору геолого-минералогических наук Михаилу Аркадьевичу Левитану (Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН) за монографию “Плейстоценовые отложения Мирового океана”.

М.А. Левитан – известный учёный-океанолог, специалист в области морской геологии и геохимии, автор более 249 научных работ, в том числе 4 монографий, участник 28 экспедиций в океане и на континентах. Основные направления его деятельности связаны с фаціальным анализом современных донных осадков морей и океанов, историей океанского осадконакопления в голоцене, плейстоцене, позднем

мезозое – кайнозое. Исследование данных глубоководного бурения различных районов Мирового океана позволило составить оригинальные обзорные литолого-фаціальные карты для двух возрастных срезов плейстоцена (нео- и эоплейстоцена) по глубоководному ложу Тихого, Индийского и Атлантического океанов, а также по ключевым районам подводных частей соответствующих континентальных окраин.

Удостоенная премии монография – это крупный вклад в развитие океанологии. Полученные данные интерпретируются в ней с точки зрения эволюции климата, оледенения, изменений уровня океана, палеоциркуляции и палеопродуктивности, а также неотектоники континентов. Автор творчески развил направления работ своих научных наставников – академиков А.П. Лисицына, А.Б. Ронова, В.Е. Хаина.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ П.А. ЧЕРЕНКОВА 2023 ГОДА – А.И. МАЛАХОВУ



Президиум РАН присудил премию им. П.А. Черенкова 2023 года доктору физико-математических наук Александру Ивановичу Малахову (Объединённый институт ядерных исследований) за цикл исследований в области релятивистской ядерной физики, проведённых в ОИЯИ и зарубежных центрах и положенных в основу физической программы ускорительного комплекса NICA.

А.И. Малахов получил уникальные результаты, в частности, при изучении ядерного кумулятивного эффекта, фазовой диаграммы ядерной материи (поиск критической точки и фазовых переходов), эффекта гашения струй. Он развил подход к описанию закономерностей релятивистских ядерных взаимодействий в пространстве четырёхмерных скоростей, который позволил предсказать отношения выходов античастиц к выходам частиц и ядер в ядерных взаимодействиях при высоких энергиях. Получено описание спектров по поперечным импульсам вторичных частиц и отношению выходов “странных” K^+ -мезонов к выходам π^+ -мезонов.

Малахов организовал научную школу молодых исследователей. Под его руководством создан ряд физических установок, в том числе на Синхрофазотроне, а затем на Нуклотроне ОИЯИ – первом

в Европе специализированном синхротроне релятивистских ядер на основе сверхпроводящих магнитов, а также первая в мире система медленного вывода ускоренных ядер из сверхпроводящего синхротрона, позволившая проводить исследования с релятивистскими ядрами, включая радиоактивные ядра и поляризованные дейтроны. Он инициировал строительство станции внутренних мишеней Нуклотрона, благодаря которой были продемонстрированы качественно новые возможности экспериментов при нарастающей энергии циркулирующего пучка.

С 1997 г. в течение 10 лет учёный возглавлял лабораторию высоких энергий ОИЯИ. Он продолжил программу исследований в рамках широкого международного научного сотрудничества на ускорительной базе института, развивал сотрудничество в области релятивистской ядерной физики с зарубежными ускорительными центрами и университетами. В частности, для эксперимента NA49/NA61 на пучках тяжёлых ионов SPS в европейской организации по ядерным исследованиям ЦЕРН были разработаны времяпролётные детекторы с рекордным временным разрешением. А.И. Малахов руководил созданием системы аэрогельных черенковских счётчиков для эксперимента PHENIX на релятивистском тяжелоионном коллайдере RHIC в США и центрального дипольного сверхпроводящего магнита установки CBM для будущего ускорительного центра FAIR в Германии.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ О.Ю. ШМИДТА 2022 ГОДА – И.И. МОХОВУ И В.А. СЕМЁНОВУ



Президиум РАН присудил премию им. О.Ю. Шмидта 2022 года академикам РАН Игорю Ивановичу Мохову и Владимиру Анатольевичу Семёнову за цикл работ “Климат Арктики: процессы и изменения”.

Работы посвящены всестороннему изучению процессов, механизмов и последствий климатических изменений в Арктике. Подобные исследования

в России традиционно основываются на уникальных результатах многочисленных арктических экспедиций, станционных показателях и данных дистанционного зондирования. Представленный цикл объединил анализ обширных массивов эмпирических данных и глобальных моделей климата с теоретическими исследованиями с использованием аппарата аналитических и численных моделей атмосферы и климата, современных методов статистического анализа в отношении различных факторов изменения климата Арктики. Это позволило значительно продвинуться в понимании механизмов происходящих изменений климата и оценить их возможные последствия.

И.И. Мохов и В.А. Семёнов, следуя традициям О.Ю. Шмидта, внесли определяющий вклад в изучение климата Арктики, а их работы охватывают практически все аспекты динамики арктического климата.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ Е.Н. ПАВЛОВСКОГО 2023 ГОДА – В.А. ПАЕВСКОМУ



Президиум РАН присудил премию им. Е.Н. Павловского 2023 года доктору биологических наук Владимиру Александровичу Паевскому (Зоологический институт РАН) за серию работ по демографической структуре популяций, продуктивности размножения и динамике численности птиц.

В.А. Паевский – ведущий специалист в области демографии и миграций птиц российского и мирового уровня. Им опубликовано более 250 научных работ, в том числе 10 монографий по разным аспектам орнитологии. Отмеченная премией серия из четырёх монографий содержит новые авторские методики определения основных демографических показателей и представляет собой сводку данных по популяционным характеристикам птиц в естественной среде обитания.

В работе “Демография птиц” впервые в отечественной литературе приведены сравнительные

показатели результативности размножения, уровня смертности, динамики численности и возрастно-половой структуры птиц разных видов. В последующих книгах (“Демографическая структура и популяционная динамика певчих птиц”, “Вьюрковые птицы мира”, “Славки мировой орнитофауны”) на примерах птиц из различных систематических групп разработаны методические подходы при популяционных исследованиях с упором на возрастную и половую структуру, динамику численности, а также на поло-специфическую выживаемость и её отличия от таковой у других групп животных. Все исследования в этой области содержат огромный объём оригинальных материалов, собранных автором вместе с коллегами и учениками в полевых условиях. Результаты анализа полученных данных и новые методики внесли существенный вклад в познание популяционно-демографических особенностей птиц. Все монографии В.А. Паевского предназначены как для орнитологов, так и для зоологов широкого профиля, работников охраны природы, аспирантов и студентов биологических специальностей.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ А.П. ВИНОГРАДОВА 2023 ГОДА –
Ю.Н. ПАЛЪЯНОВУ, А.Г. СОКОЛУ И Ю.В. БАТАЛЕВОЙ



Президиум РАН присудил премию им. А.П. Виноградова 2023 года члену-корреспонденту РАН Юрию Николаевичу Пальянову, доктору геолого-минералогических наук Александру Григорьевичу Соколу и доктору геолого-минералогических наук Юлии Владиславне Баталевой (Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН) за цикл работ “Экспериментальное моделирование процессов, определяющих глобальные геохимические циклы углерода, серы и азота, и их роли в эволюции мантии Земли”.

Цикл включает 20 статей, опубликованных в период 2004–2023 гг., в которых решаются такие важнейшие геохимические проблемы, как глобальные геохимические циклы углерода, серы и азота, непосредственно связанные с общей эволюцией мантии Земли и представляющие интерес для реконструкции целого ряда магматических и метасоматических процессов глубинного минералообразования. Несколько работ посвящены экспериментальному моделированию минералообразующих процессов

в условиях литосферной мантии и зон субдукции, сопряжённых с генерацией флюидов и расплавов, что имеет принципиальное значение для глобальных геодинамических построений.

В научную и прикладную деятельность авторов входит экспериментальное моделирование процессов алмазообразования, включая рост крупных высококачественных кристаллов алмаза с заданными свойствами. Экспериментально изучены минералообразующие процессы литосферной мантии, определены условия генерации окисленных расплавов и флюидов, выявлена их роль в процессах метасоматоза глубинных пород. По результатам экспериментов предложены модели генерации кимберлитовых магм и фракционирования изотопов углерода в восстановленных и окисленных доменах литосферной мантии. Определены граничные условия кристаллизации алмаза в различных системах, позволившие аргументировать концепцию генезиса алмаза в глубинных магматических и метаморфических процессах.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ Д.С. КОРЖИНСКОГО 2022 ГОДА – О.Г. САФОНОВУ



Президиум РАН присудил премию им. Д.С. Коржинского 2022 года доктору геолого-минералогических наук, профессору РАН Олегу Геннадьевичу Сафонову (Институт экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН) за серию работ “Активность щелочей в процессах преобразования коры и верхней мантии: развитие идей академика Д.С. Коржинского и перспективы”.

Научные интересы автора охватывают широкий спектр проблем теоретической и эксперимен-

тальной петрологии магматических и метаморфических пород, термодинамики минералов и флюидов и их равновесий, минералогической термобарометрии. Представленная серия включает 10 статей, опубликованных в ведущих российских и международных изданиях в период 2012–2021 гг. Они имеют большое значение для физико-химической петрологии и геохимии и основаны на концепции об определяющей роли термодинамической активности щелочных компонентов, прежде всего калия и натрия, в процессах высокотемпературного метаморфизма и гранитообразования, которая разрабатывалась академиком Д.С. Коржинским в 1940–1960 гг.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ А.А. БЕЛОПОЛЬСКОГО 2023 ГОДА –
М.Е. САЧКОВУ, В.Г. КЛОЧКОВОЙ И В.Е. ПАНЧУКУ



Президиум РАН присудил премию им. А.А. Белопольского 2023 года доктору физико-математических наук Михаилу Евгеньевичу Сачкову (Институт астрономии РАН), доктору физико-математических наук Валентине Георгиевне Клочковой и доктору физико-математических наук Владимиру Евгеньевичу Панчуку (Специальная астрофизическая обсерватория РАН) за цикл работ “Исследования атмосфер звёзд методами спектроскопии высокого разрешения”.

Авторы являются признанными специалистами в области спектроскопии звёзд и астрономического приборостроения. Они опубликовали более 400 работ, основанных на собственных многолетних оптических наблюдениях, а также содержащих данные с крупнейших телескопов мира. Получены важные

научные результаты, оказавшие существенное влияние на развитие спектроскопии звёзд: определены содержание химических элементов обширного класса звёзд, параметры звёздных атмосфер, исследованы пульсационные волны в атмосферах звёзд. Труды авторов обеспечивают современный уровень астрономических наземных спектроскопических наблюдений в России. Последовательно разработаны два поколения спектрографов, которые долгое время оставались единственными в стране пригодными для спектроскопии высокого разрешения. Внедрены предложения соискателей для построения спектральных и фотометрических приборов орбитальной обсерватории “Спектр-УФ” и наземной поддержки этого проекта. Отдельные технические решения в области приборостроения защищены патентами РФ.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ Д.Н. ПРЯНИШНИКОВА 2023 ГОДА – В.М. СЕМЁНОВУ



Президиум РАН присудил премию им. Д.Н. Прянишникова 2023 года доктору биологических наук Вячеславу Михайловичу Семёнову (Пушкинский научный центр биологических исследований РАН) за цикл работ “Экологическая агрохимия азота и углерода”.

В.М. Семёнов – один из создателей нового научного направления “экологическая

агрохимия”. Большой резонанс среди учёных и практиков вызвала его работа по диагностике здоровья и качества почв. Автор убедительно и обстоятельно доказал необходимость выделения в сфере фундаментальной и прикладной агрохимии новой области – агрохимии углерода. Многоплановый материал представленного цикла, теоретически актуальный в агрохимии, почвоведении и экологии, имеет и практическое значение для государственных и региональных программ повышения устойчивости земледелия к глобальным изменениям климата, обеспечения продовольственной безопасности и рационального природопользования.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ С.Л. РУБИНШТЕЙНА 2023 ГОДА –
Е.А. СЕРГИЕНКО И А.О. ПРОХОРОВУ



Президиум РАН присудил премию им. С.Л. Рубинштейна 2023 года доктору психологических наук Елене Алексеевне Сергиенко (Институт психологии РАН) и доктору психологических наук Александру Октябриновичу Прохорову (Казанский (Приволжский) федеральный университет) за серию научных работ по тематике “Субъектно-процессуальный подход к изучению психического развития и состояний человека”.

Авторы провели фундаментальное научное исследование, в рамках которого развиваются основные теоретические идеи и принципы, заложенные С.Л. Рубинштейном. В монографиях рассматриваются актуальные методологические проблемы современной психологии, дана аналитическая оценка исторического опыта развития этой науки, обозначены её новые ориентиры. Удостоенные премии работы отражают традиции российской психологической науки, опираются на её культурно-исторические корни. Обозначены перспективные

направления повышения значимости отечественной психологии, связанные с более глубоким раскрытием потенциала субъектно-деятельностного подхода Рубинштейна, в том числе в международном дискурсе.

Системно-субъектный подход Е.А. Сергиенко позволяет обратиться к субъектности человека в широком контексте его взаимодействий, что открывает путь к интеграции различных подходов и методов. Операционализация структуры и функций субъекта и личности помогает существенно расширить эмпирические решения научных психологических задач. Подобные новые теоретические и эмпирические направления изучения человека как субъекта жизнедеятельности дают возможность перейти к его интегративному исследованию.

Значительный вклад в развитие идей С.Л. Рубинштейна внесли разработки в области психологии состояний субъекта, представленные в монографиях А.О. Прохорова. В них предложена и апробирована системно-функциональная концепция регуляции состояний, представляющая собой трёхуровневую организацию, в основании которой находятся механизмы регуляции отдельного психического состояния. Центральное место в управлении регуляторным процессом занимает ментальный (субъективный) опыт. С этих позиций состояние субъекта рассматривается как психический феномен, который является составной частью целостной психической деятельности. Данный подход положил начало созданию отечественной научной школы по изучению психических состояний.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ А.Н. ВЕСЕЛОВСКОГО 2023 ГОДА – И.В. СИЛАНТЬЕВУ



Президиум РАН присудил премию им. А.Н. Веселовского 2023 года члену-корреспонденту РАН Игорю Витальевичу Силантьеву за серию работ по общей теории эпического и лирического мотива и метода комплексного анализа мотива в системе художественного произведения (“Поэтика мотива”, “Сюжетологические исследования”, “Сюжет и смысл”).

С учётом значимых достижений в отечественной и западной науке формулируется теория мотивики в литературоведении и фольклористике. Основное внимание уделяется общей теории

эпического и лирического мотива и методу комплексного анализа мотива в системе художественного произведения. Категория мотива рассматривается с позиции сюжетологии, анализируются различные её аспекты (жанр, герой, фабула и др.). Автор обратился к сюжетике как к фактору жанрообразования в русской литературе XV–XVI вв., разработал типологию сюжетов, предложил методологически выверенный взгляд на становление романа в древнерусской книжности. В работах Силантьева исследования в области историографии филологической науки, истории и теории литературы, нарратологии, сюжетологии, герменевтики, фольклористики сочетаются с изучением поэтики русских писателей в широком историческом диапазоне: от создателей древнерусских притч до А.С. Пушкина и писателей XX в.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ А.Н. СЕВЕРЦОВА 2023 ГОДА –
С.В. СМИРНОВУ, А.А. ЦЕССАРСКОМУ И Ф.Н. ШКИЛЮ



Президиум РАН присудил премию им. А.Н. Северцова 2023 года доктору биологических наук Сергею Васильевичу Смирнову, кандидату биологических наук Алексею Альбертовичу Цессарскому и кандидату биологических наук Фёдору Николаевичу Шкилю (Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН) за цикл работ “Эволюционная изменчивость онтогенеза рыб”.

Труды коллектива авторов – результат многолетних исследований эволюции онтогенеза рыб и прямое продолжение идей и научных традиций, заложенных академиком А.Н. Северцовым. Рассматриваются фундаментальные проблемы эволюционной биологии, над которыми работали Северцов и его ученики. Основной целью стали анализ пластичности и изменчивости индивидуального развития рыб и установление связи этих явлений с процессами эволюционных преобразований онтогенеза.

Весомый вклад в эволюционную биологию внёс созданный авторами метод индуцированных гетерохроний, основанный на искусственном изменении гормонального статуса развивающегося подопытного животного и позволяющий

экспериментально тестировать гипотезы о соотношении онто- и филогенеза. Теория филэмбриогенеза А.Н. Северцова о роли гетерохроний в эволюционных преобразованиях получила убедительное подтверждение и дальнейшее развитие в опытах на целом ряде таксонов рыб, в том числе с использованием экспериментальных подходов. С помощью методов гормональной инженерии показана и проверена роль гетерохроний в стремительной морфологической диверсификации при адаптивной радиации и симпатрическом видообразовании рыб. Дальнейшее совершенствование данного подхода в сочетании с количественными методами сравнительного анализа позволило выявить и проанализировать роль гетерохроний в диверсификации скелетных систем, мускулатуры и паттернов окраски у костистых рыб на разных уровнях таксономической иерархии. На примере осетрообразных удалось продемонстрировать ведущую роль гетерохронных сдвигов предкового онтогенеза в макроэволюционных процессах, связанных с глубокой перестройкой морфологии и возникновением эволюционных новшеств.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ А.Д. АРХАНГЕЛЬСКОГО 2023 ГОДА –
А.А. СОРОКИНУ, В.А. ЗАЙКЕ И А.Ю. КАДАШНИКОВОЙ



Президиум РАН присудил премию им. А.Д. Архангельского 2023 года члену-корреспонденту РАН Андрею Анатольевичу Сорокину, кандидату геолого-минералогических наук Виктору Александровичу Заике и Александре Юрьевне Кадашниковой (Институт геологии и природопользования ДВО РАН) за цикл работ “Геодинамическая эволюция Монголо-Охотского орогенного пояса и тектоническая позиция рудных месторождений”.

Цикл включает 21 статью 2018–2023 гг., где представлены результаты многолетних комплексных

геологических, геохронологических, геохимических и изотопно-геохимических исследований, позволивших выявить принципиально новые особенности геологического строения и формирования восточной части Монголо-Охотского орогенного пояса, а также закономерности образования и локализации в его пределах золоторудных месторождений. Кроме того, благодаря установлению возраста рудных объектов, корреляции процессов метаморфизма, магматизма и рудообразования открываются новые возможности в области прогноза рудных месторождений.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО 2023 ГОДА – В.В. ШОКУРОВУ



Президиум РАН присудил премию им. Н.И. Лобачевского 2023 года доктору физико-математических наук Вячеславу Владимировичу Шокурову (Математический институт им. В.А. Стеклова РАН) за цикл работ “Бирациональная геометрия перестроек”.

Работы автора заложили основу нового направления современной алгебраической геометрии – теории минимальных моделей алгебраических многообразий. Решены проблемы существования трёх- и четырёхмерных перестроек (флипов), создана техника, позволяющая обобщить эти результаты

в произвольную размерность, введены основные понятия, сформулирована программа развития бирациональной геометрии на многие годы вперёд.

В.В. Шокуров – один из крупнейших специалистов мирового уровня в области бирациональной алгебраической геометрии, полученные им результаты играют фундаментальную роль в развитии современной математики. Построенная им теория дополнений нашла применение при классификации особенностей и доказательстве ограниченности многообразий Фано. Главная гипотеза об ограниченности дополнений была доказана много лет спустя, в 2016 г., его учеником К. Биркарром. Это стало одной из основных ступеней на пути к доказательству гипотезы Борисова–Алексеева–Борисова об ограниченности многообразий Фано.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ А.Ф. ИОФФЕ 2023 ГОДА – М.В. ЭНТИНУ



Президиум РАН присудил премию им. А.Ф. Иоффе 2023 года доктору физико-математических наук Матвею Вульффовичу Энтину (Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН) за цикл работ “Теория фотогальванического эффекта в средах без центра инверсии”.

В работах описан и теоретически исследован эффект генерации электрического тока при поглощении света в однородных средах без центра инверсии, названный фотогальваническим. В отличие от известных фотоэлектрических явлений, основанных на разделении зарядов противоположного знака в электрическом поле (например, поле

p-n-перехода), фотогальванический эффект не требует пространственной неоднородности структуры или освещения. Он возникает за счёт асимметрии электрон-фотонного взаимодействия или релаксации носителей заряда в средах без центра инверсии, например, в кристаллах пьезоэлектриков, а направление фототока зависит от поляризации излучения.

Отмечена определяющая роль симметрии кристалла в возникновении фотогальванического эффекта, выявлены и исследованы механизмы поляризационно-зависимого фотогальванического эффекта в различных системах: объёмных кристаллах, тонких плёнках, квантово-размерных структурах. Пионерские работы М.В. Энтина и его коллег заложили основу обширной области физического знания и нового метода исследования твёрдых тел: их симметрии, энергетического спектра и процессов релаксации носителей заряда.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ И.И. МЕЧНИКОВА 2023 ГОДА –
Н.В. ЯГЛОВОЙ И С.С. ОБЕРНИХИНУ

Президиум РАН присудил премию им. И.И. Мечникова 2023 года доктору медицинских наук Наталье Валентиновне Ягловой и доктору медицинских наук Сергею Станиславовичу Обернихину (Российский научный центр хирургии им. академика Б.В. Петровского) за монографию “Развитие иммунной системы потомства после иммуностимулирующего воздействия в ранние сроки беременности”.

Монография объединяет результаты многолетних исследований развития и функционирования иммунной системы мышей, перенёсших иммуностимулирующее воздействие на ранних сроках беременности. В качестве иммуностимуляторов использовали Т-клеточный лиганд конканавалин А и В-клеточный лиганд липополисахарид. Установлены особенности постнатального развития центральных и периферических органов иммунной системы потомства, подвергшегося в ранний

эмбриональный период цитокиновому всплеску организма матери. Влияние цитокинов на презумптивные зачатки органов иммунной системы зародыша приводит к постнатальным последствиям. Наблюдается дисбаланс между процессами пролиферации и дифференцировки, а в постпубертатном периоде происходит снижение пролиферативной активности, миграция тимоцитов и замедление морфогенеза и возрастных инволютивных изменений, что тормозит становление иммунной системы. Впервые продемонстрированы отличия реакций иммунной системы при развитии системного воспалительного процесса и формировании противоопухолевого иммунитета, которые характеризуются меньшей выраженностью и более поздним началом.

Представленные в монографии сведения образуют научно обоснованную концепцию функционирования органов иммунной системы потомства после всплеска активности иммунитета матери на ранних сроках беременности. Следует отметить, что стимулирующий материнские лимфоциты эффект возможен как в случае фармакологического воздействия, так и в результате перенесённых инфекционных заболеваний, в том числе COVID-19.

Полученные данные носят приоритетный характер и обладают большой научно-практической ценностью, а открытые авторами механизмы объясняют особенности становления иммунной системы потомства после цитокинового шторма у матери.