

ISSN 0203-0306

Номер 2

Март–Апрель 2025



ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2025

Синтетический каталог землетрясений Восточного сектора
Арктической зоны Российской Федерации

*П. Н. Шебалин, А. Д. Гвишиани, П. А. Малютин,
Е. М. Греков, А. О. Антипова, И. А. Воробьева, Б. А. Дзедобоев, Б. В. Дзеранов* 3

Соотношение между магнитудами MLH и M_w для Курило-Охотского региона
и его использование для транзитных пересчетов в другие магнитуды

Д. А. Сафонов 20

Кратерные озера хребта Вернадского о. Парамушир (Курильские острова):
водный баланс и динамика

Т. А. Котенко 38

Анализ вариации сигнала аэрозольного лидара как возможного индикатора
локальной сейсмической активности

А. В. Мясников, А. Л. Собисевич, С. М. Першин, М. Я. Гришин, В. Н. Леднёв, В. А. Завозин 52

О проявленности типовых предвестниковых аномалий в форшоковых областях
сильных землетрясений, Курило-Камчатский регион

М. В. Родкин, М. Ю. Андреева 62

ДИСКУССИИ

О проявлении предвестников сильных ($M_w \geq 6.6$) землетрясений Камчатки

Г. Н. Копылова, Ю. К. Серафимова, В. А. Касимова 73

Комментарии к статье Г. Н. Копыловой, Ю. К. Серафимовой, В. А. Касимовой
“О проявлении предвестников сильных ($M_w \geq 6.6$) землетрясений Камчатки”

В. А. Салтыков 99

CONTENTS

No. 2, 2025

Synthetic Earthquake Catalog for the Eastern Sector of the Arctic Zone of the Russian Federation <i>P. N. Shebalin, A. D. Gvishiani, P. A. Malyutin, E. M. Grekov, A. O. Antipova, I. A. Vorobiova, B. A. Dzeboev, B. V. Dzeranov</i>	3
The Relationship between Magnitudes MLH and M_w for the Kuril-Okhotsk Region and its Use for Transit Conversions to Other Magnitudes <i>D. A. Safonov</i>	20
Crater Lakes of the Vernadsky Ridge of Paramushir Island (Kuril Islands): Water Balance and Dynamics <i>T. A. Kotenko</i>	38
Analyzing Aerosol Lidar Signal Variation as a Possible Local Seismic Activity Indicator <i>A. V. Myasnikov, A. L. Sobisevich, S. M. Pershin, M. Ya. Grishin, V. N. Lednev, V. A. Zavozin</i>	52
On the Identification of Typical Precursor Anomalies in the Foreshock Areas of Strong Earthquakes, Kuril-Kamchatka Region <i>M. V. Rodkin, M. Yu. Andreeva</i>	62

DISCUSSIONS

On the Manifestation of Precursors of Strong Earthquakes ($M_w \geq 6.6$) in Kamchatka <i>G. N. Kopylova, Yu. K. Serafimova, V. A. Kasimova</i>	73
Comments on the article by G. N. Kopylova, Yu. K. Serafimova, V. A. Kasimova “On the manifestation of precursors of strong ($M_w \geq 6.6$) earthquakes in Kamchatka” <i>V. A. Saltykov</i>	99

УДК 550.343.6

СИНТЕТИЧЕСКИЙ КАТАЛОГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2025 г. П. Н. Шебалин^{a, b, *}, А. Д. Гвишиани^{a, c}, П. А. Малютин^b, Е. М. Греков^b,
А. О. Антипова^{a, b}, И. А. Воробьева^{a, b}, Б. А. Дзедоев^{a, c}, Б. В. Дзеранов^a

^aГеофизический центр РАН, ул. Молодежная, 3, Москва, 119296 Россия

^bИнститут теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,

ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия

^cИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,

ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

*e-mail: p.n.shebalin@gmail.com

Поступила в редакцию 15.10.2024 г.

После доработки 15.10.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

В работе построен синтетический каталог землетрясений Восточного сектора Арктической зоны Российской Федерации. Он воспроизводит и моделирует ключевые свойства каталога фактически произошедших землетрясений в регионе. На региональном уровне выполняется закон повторяемости землетрясений разной магнитуды Гутенберга–Рихтера как для каталога в целом, так и каталога основных толчков, в котором удалены афтершоки. Воспроизводятся локальные значения параметров этого закона. Синтетический каталог включает афтершоки, при этом соблюдаются локальные соотношения числа афтершоков и общего числа землетрясений, оцененные по каталогу реальных событий. В качестве модели пространственного распределения сильнейших землетрясений в регионе ($M \geq 5.5$) используются результаты распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений по методике FCAZ. Проведены предварительные расчеты нормативной интенсивности для сравнения трех вариантов синтетического каталога (полная модель, без учета афтершоков, без учета результатов FCAZ распознавания и афтершоков).

Ключевые слова: сейсмический режим, модель, синтетический каталог землетрясений, верификация модели, L-тест, Восточный сектор АЗРФ, распознавание мест возможного возникновения землетрясений, FCAZ, афтершоки, продуктивность землетрясений

DOI: 10.31857/S0203030625010012, EDN: GJAVEQ

ВВЕДЕНИЕ

Главным инструментом минимизации ущерба от землетрясений в настоящее время практически во всех сейсмоопасных регионах мира является сейсмостойкое строительство на основе карт сейсмического районирования. Первоначально такие карты строились на детерминистском принципе (детерминистический анализ сейсмической опасности, ДАСО): считалось, что если в каком-то месте землетрясение уже произошло, то землетрясения такой же силы в этом же месте могут произойти снова. Поэтому основной задачей детерминистского

подхода было определить места и силу землетрясений прошлого, а также определить другие возможные места новых землетрясений. Была принята парадигма активных тектонических разломов в качестве сейсмогенерирующих структур. Поскольку считалось, что очаг сильного землетрясения формируется по уже готовому разлому, предполагалось, что максимальная магнитуда землетрясения должна соответствовать предельному размеру очага, ограниченного размерами разлома. Но внутриконтинентальные землетрясения происходят в одном и том же месте крайне редко, поэтому

для целей общегражданского строительства необходимо было как-то ограничить возможные места сильных землетрясений с учетом их повторяемости.

Параллельно, с развитием системы страхования от последствий землетрясений, возникла необходимость введения вероятностных оценок силы воздействия от землетрясений в заданных точках или на заданных объектах. Так возник вероятностный подход к оценке сейсмической опасности. В России такой подход получил сокращение ВАСО (вероятностный анализ сейсмической опасности), в международной литературе — PSHA (probabilistic seismic hazard assessment). Несмотря на критику этого подхода со стороны большого числа ученых, оценки сейсмической опасности, рассчитанные с помощью этого подхода, остаются нормативными в большинстве стран, в которых есть сейсмоопасные регионы, включая Россию.

Более того, этот подход повсеместно используется именно в том виде, в котором он был разработан в 1960–1970 гг. и внедрен по всему миру в 1990-е гг. в рамках программы GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program) [Giardini et al., 1999] и затем GEM (Global Earthquake Model). По сути, это лишь надстройка над детерминистским подходом с добавлением элементов оценки вероятности сейсмических проявлений на заданном интервале времени. Как и в детерминистском анализе, этот подход включает решение двух независимых задач: 1) определение потенциальных очагов будущих землетрясений (в вероятностном анализе с учетом их средней повторяемости), 2) построение модели затухания сейсмических волн от очага землетрясения до конкретного объекта или точки на поверхности Земли.

По-прежнему основными сейсмогенерирующими структурами считаются активные разломы. Фактор времени добавлен путем включения главного элемента ВАСО — закона Гутенберга–Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944], который устанавливает подобие числа землетрясений в единицу времени для землетрясений разной магнитуды. Этот закон позволяет по статистике менее сильных землетрясений оценивать повторяемость более сильных.

Фактически любые модели затухания могут применяться как в ВАСО, так и в ДАСО.

Первоначально использовались простейшие модели макросейсмического поля Блейка–Шебалина [Шебалин, 2003], которые устанавливают соотношение между интенсивностью сотрясений в баллах (шкалы Mercalli, MSK-64) и магнитудой, глубиной очага и эпицентральной расстоянием. Одновременно с макросейсмической шкалой стали применяться инструментально измеряемые величины (пиковое ускорение грунта, PGA, Peak Ground Acceleration; пиковая скорость грунта, PGV, Peak Ground Velocity). В современных условиях для инженерных целей помимо пиковых значений часто используются спектральные параметры, позволяющие рассчитать отклик сооружений на воздействия сейсмических волн разной частоты.

Быстрый рост объемов и качества наблюдательной базы, совершенствование вычислительной техники привели за последние десятилетия к значительному прогрессу в решении второй задачи: воздействия на объекты от землетрясений с конкретными параметрами можно рассчитать достаточно точно. А вот решение первой задачи — определения мест и повторяемости будущих землетрясений разной силы — по-прежнему часто приводит к значительным ошибкам. Многие сильнейшие землетрясения происходят в неожиданных местах [Wyss et al., 2012; Шебалин, 2024], но при этом на больших территориях оценки вероятной силы воздействия от землетрясений за определенный период оказываются завышенными [Шебалин и др., 2022; Шебалин, 2024].

В России в настоящее время используется комплект карт Общего сейсмического районирования ОСР-2015, которые являются нормативными при строительстве в сейсмоопасных районах. На картах обозначены зоны нормативной балльности, рассчитанной для разных интервалов времени. Карта А представляет зоны ожидаемой в течение 50 лет интенсивности воздействия землетрясений по шкале МСК-64 с вероятностью 10%, карта В — с вероятностью 5%, карта С — с вероятностью 1%. Карты ОСР-2015 в значительной степени воспроизводят карты ОСР-97 [Комплект ..., 1999], впервые построенные в рамках ВАСО. Главные отличия, помимо включения территории Крыма, состоят в увеличении нормативной балльности в восточной части Российской Арктики: на севере Якутии

и на севере Камчатки. Эти изменения были вызваны Олюторским землетрясением 2006 г. в Корякии и Иллин-Тасским землетрясением 2013 г. на севере Якутии. Оба землетрясения можно считать пропусками на карте ОСР-97, поскольку их воздействие оказалось выше ожидаемого примерно на 2 балла [Шебалин, 2024]. Частично эти пропуски можно оправдать недостаточной изученностью малонаселенных районов, в которых произошли землетрясения. Помимо карт ОСР-97 и ОСР-2015 короткое время действовал также комплект карт ОСР-2016 [Пояснительная ..., 2016]. Для рассматриваемого региона эти карты отличаются как от карт ОСР-97, так и от карт ОСР-2015 (рис. 1). Нормативная балльность в регионе несколько снижена по сравнению с ОСР-2015. Тем не менее отличия трех поколений карт недостаточны, чтобы компенсировать общее завышение нормативной балльности на больших территориях, обнаруженное в работах [Шебалин и др., 2022; Шебалин, 2024]. Таким образом, вопрос о более точной оценке сейсмической опасности в регионе остается актуальным.

В основу трех поколений вероятностных карт ОСР легла линейно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель зон ВОЗ (возможных очагов землетрясений) [Ulomov, 1999]. Идеология моделей типа ЛДФ была предложена Корнеллом в 1968 г. [Cornell, 1968]: комбинация линейных и площадных структур позволяла ему получать аналитические выражения для перехода от модели зон ВОЗ к модели сотрясаемости. Позднее появилась возможность замены аналитических

выражений Корнелла расчетами с помощью метода Монте-Карло. При таком подходе формируется синтетический каталог землетрясений, реализующий повторяемость землетрясений разной магнитуды в соответствии с параметрами закона Гутенберга–Рихтера, установленными для элементов ЛДФ-модели, а величина нормативной интенсивности определяется путем многократной реализации синтетического каталога на таких интервалах и пересчетом по формулам затухания.

Все три поколения карт ОСР, о которых говорилось выше, построены с помощью синтетического каталога. Представление оценок сейсмической опасности в виде комплекта карт нормативной балльности удобно и привычно для целей строительства. Но для экономических расчетов, включая оценки сейсмического риска ущерба от землетрясений, ценность представляет и собственно синтетический каталог, если в него включен фактор времени. Это связано с тем, что одна и та же нормативная балльность в какой-либо точке на карте ОСР может достигаться как небольшим числом очень редких сильных землетрясений, так и большим числом более слабых землетрясений. На карте ОСР эти два варианта неразличимы, но при расчетах сейсмического риска разница между двумя вариантами очень велика [Шебалин и др., 2024].

Модели типа ЛДФ давно подвергаются критике, главным образом из-за их субъективного характера [Gerstenberger et al., 2020]. Альтернативой моделям типа ЛДФ являются модели

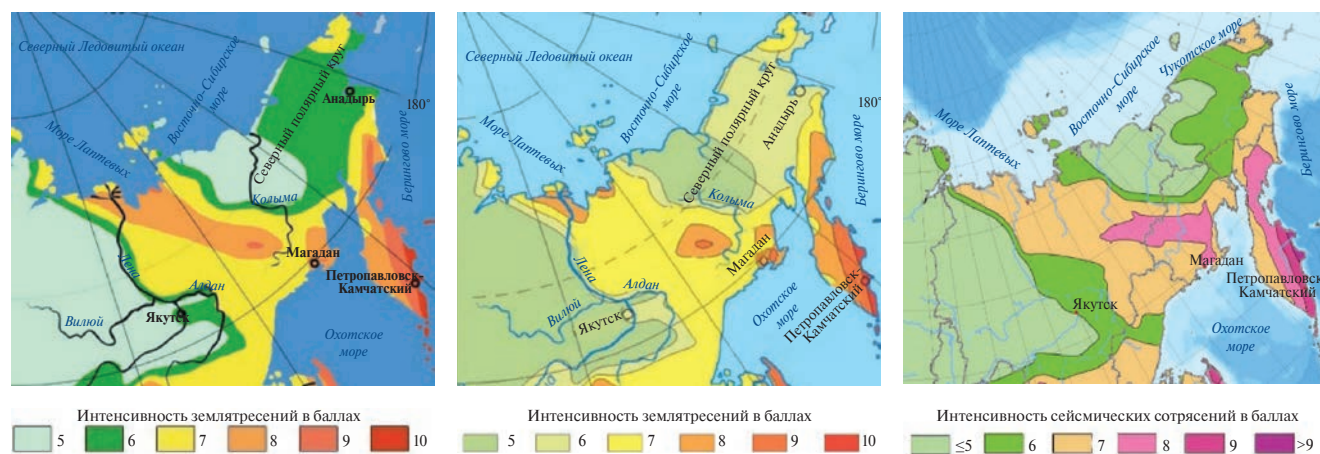


Рис. 1. Фрагменты карт ОСР для Востока Российской Арктики. Показаны фрагменты карт ОСР-97А (слева), ОСР-2015А (в центре), ОСР-2016А (справа).

сглаженной сейсмичности [Akinci et al., 2018; Helmstetter, Werner, 2012; Stock, Smith, 2002], учитывающие закон Гутенберга–Рихтера. Этот подход обеспечивает гораздо более точные в пространственном отношении оценки параметров по сравнению с моделями типа ЛДФ, но требует значительно большего количества зарегистрированных землетрясений в широком диапазоне магнитуд для построения детальной и точной модели сейсмического режима [Ризниченко, 1980]. Главная проблема в таких моделях — “размазывание” сейсмической активности, почти неизбежное при использовании процедуры сглаживания. В результате в наиболее опасных местах активность оказывается заниженной, а на краях активных зон завышенной.

Проблема усугубляется тем, что при нормировании активности на площадь, как правило, не учитывается фрактальная структура пространственного распределения эпицентров [Kossobokov, Mazhkenov, 1994; Spada et al., 2011]. Значительный прогресс в построении моделей сглаживания был достигнут с появлением высококонтрастного метода среднего положения (МСП) [Vorobieva et al., 2024; Shebalin et al., 2024], разработанного в Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (ИТПЗ РАН) в рамках проекта РНФ № 20-17-00180 “Развитие сценарного подхода в задачах оценки сейсмической опасности и риска”. В отличие от практически всех моделей сглаживания сейсмичности, в МСП значения параметров приписываются среднему положению эпицентров землетрясений, использованных в расчетах (а не центру круга), а площадная нормировка производится с учетом фрактальности.

В расчетах ОСР при оценке параметров ЛДФ-модели по реальному каталогу землетрясений афтершоки исключались из рассмотрения. Оставшиеся землетрясения обычно называются фоновыми. Такой подход основан на гипотезе, что повторяемость фоновых землетрясений в окрестности каждой точки в рассматриваемом регионе не изменяется во времени [Gardner, Knopoff, 1974]. Афтершоки концентрируются в пространстве и времени вблизи отдельных землетрясений и их число обычно сопоставимо с числом фоновых

землетрясений. Использование полного каталога, без удаления афтершоков (так называемой процедуры декластеризации), неизбежно приводило бы к локальному завышению опасности вблизи эпицентров сильных землетрясений.

С другой стороны, игнорирование афтершоков может приводить к недооценке сейсмической опасности [Шебалин, 2024]. В рамках проекта РНФ № 20-17-00180 в ИТПЗ РАН была предложена “симметричная” процедура декластеризации каталога и моделирования последовательности афтершоков в синтетическом каталоге землетрясений [Shebalin et al., 2024]. Декластеризация осуществляется по методу Заляпина [Zaliapin et al., 2008; Zaliapin, Ben-Zion, 2013], в котором строятся цепочки афтершоков разных поколений, реализующих модель ETAS [Zhuang et al., 2002]. При создании синтетического каталога сначала генерируются фоновые события, а затем по модели ETAS генерируются афтершоки. Используется вариант модели ETAS-е, в котором учитывается экспоненциальный закон продуктивности [Baranov et al., 2019; Shebalin et al., 2020]. Применение метода Заляпина для декластеризации каталога и модели ETAS-е в значительной степени компенсирует возможные ошибки декластеризации [Baranov et al., 2022]. В случае, если число фоновых событий при декластеризации занижено, оказывается завышенным число афтершоков. Это приводит к увеличению средней продуктивности землетрясений, благодаря чему при моделировании по модели ETAS-е генерируется большее число афтершоков, частично компенсирующее недостаток фоновых событий.

В зонах высокой сейсмичности главную опасность представляют сильные землетрясения. Они происходят очень редко, но их воздействие распространяется на большие территории. Одна из важнейших задач в моделях сглаженной сейсмичности состоит в том, чтобы максимально сузить области, в которых могут возникать сильные землетрясения [Gerstenberger et al., 2020]. Без решения этой задачи зона возможного возникновения сильных землетрясений “размазывается”, вследствие чего в зонах, где сильные землетрясения действительно могут возникнуть, их ожидаемая повторяемость оказывается заниженной, а по краям этих зон завышенной. Один из возможных способов

сужения областей, в которых ожидаются сильные землетрясения, — использование части модели ЛДФ, определяющей линейные структуры. Этот подход, однако, остается весьма субъективным. Кроме того, он неизбежно приведет к ошибкам типа пропуска цели, поскольку сильные землетрясения довольно часто происходят далеко от уже известных активных разломов и тем более от линеаментов, определяющих в ЛДФ-модели места возможных сильных землетрясений. Другой возможный подход — это использование результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений по методике EPA (Earthquake Prone Areas) [Гвишиани и др., 2020]. Именно этот подход было предложено использовать в методике создания синтетического каталога землетрясений, разработанной в ИТПЗ РАН в рамках проекта РНФ № 20-17-00180 [Shebalin et al., 2024]. Выделенные и распознанные по геолого-геофизическим признакам морфоструктурные узлы определяют в синтетическом каталоге возможные места сильных землетрясений. Эпицентры таких землетрясений сосредоточены вблизи центров узлов, но могут удаляться в пределах 30 км. Распределение направлений при этом не однородно, а определяется геометрией близлежащих активных разломов, которые находятся по базе данных Геологического института РАН (ГИН РАН) [Zelenin et al., 2022]. В данной работе мы реализуем третий возможный подход, используя результаты FCAZ-распознавания [Dzeboev et al., 2021] мест возможного возникновения сильных землетрясений в рассматриваемом регионе [Gvishiani et al., 2022b].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И КЛЮЧЕВЫЕ ПРИНЦИПЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

В данной работе мы ставим задачу построения синтетического каталога землетрясений в Восточном секторе Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) на условный период 20 000 лет, воспроизводящего основные свойства реального каталога. К таким свойствам относятся:

- региональная повторяемость (рассчитанная для всего региона в единицу времени) фоновых землетрясений во всех интервалах магнитуды;

- региональное соотношение числа афтершоков и фоновых событий;
- локальная повторяемость (оцененная для малой окрестности каждой точки рассматриваемой территории на единицу площади в единицу времени) фоновых землетрясений (без учета афтершоков);
- локальные соотношения числа фоновых землетрясений разной магнитуды (параметр b закона Гутенберга—Рихтера);
- локальные свойства группирования землетрясений;
- пространственное распределение эпицентров сильных землетрясений.

Методика построения синтетического каталога землетрясений с такими свойствами была недавно разработана в ИТПЗ РАН в рамках проекта РНФ № 20-17-00180 “Развитие сценарного подхода в задачах оценки сейсмической опасности и риска” [Shebalin et al., 2024]. Ключевые принципы этого подхода следующие:

- на первом этапе генерации синтетического каталога формируется каталог фоновых событий с магнитудой $M \geq M_0$ (порог генерации выбирается исходя из целей создания синтетического каталога);
- время каждого фонового события генерируется в соответствии с распределением Пуассона с параметром, равным региональной повторяемости числа событий с $M \geq M_0$;
- магнитуда каждого события генерируется в соответствии с региональным магнитудно-частотным распределением [Shebalin et al., 2024];
- координаты эпицентра каждого фонового события генерируются по модели распределения локальной повторяемости землетрясений данной магнитуды; если магнитуда события превышает заданный порог M_{strong} , то используется модель пространственного распределения сильных землетрясений [Shebalin et al., 2024];
- для каждого фонового землетрясения по модели ETAS-e [Shebalin et al., 2020] генерируется иерархическая последовательность афтершоков; такая последовательность может быть пустой и не содержать ни одного события.

Для проверки выполнения в синтетическом каталоге свойств каталога фактически зарегистрированных землетрясений проводится ряд тестов.

МЕТОД

Здесь мы используем методику работы [Shebalin et al., 2024]. Она включает: 1) разделение каталога землетрясений на фоновые события и афтершоки; 2) построение высококонтрастной модели параметров сейсмического режима фоновых землетрясений; 3) оценку параметров афтершоков: региональную оценку параметров c и p закона Омори–Утсу и параметра b закона Гутенберга–Рихтера, а также локальные оценки средней продуктивности; 4) генерацию синтетического каталога фоновых событий; 5) генерацию последовательностей афтершоков и формирование полного синтетического каталога; 6) верификацию синтетического каталога. Важным элементом этой методики является ограничение возможных мест сильных землетрясений. В работе [Shebalin et al., 2024] предлагается использовать для этого результаты распознавания по методике ЕРА [Гельфанд и др., 1972; Гвишиани и др., 2020]. В данной работе ограничения вводятся в соответствии с результатами FCAZ-распознавания [Gvishiani et al., 2022b].

Первые два и последний элемент были описаны и реализованы для рассматриваемого региона в работе [Воробьева и др., 2024], где было приведено детальное обоснование применяемых методик. Здесь мы приведем их сокращенное описание, остановившись подробнее на остальных элементах.

Разделение каталога землетрясений на фоновые события и афтершоки

Используемый здесь метод ближайшего соседа Заляпина–Бен-Зиона [Zaliapin et al., 2008; Zaliapin, Ben-Zion, 2013] для декластеризации каталога по сути является обратным относительно метода генерации афтершоков в синтетическом каталоге по модели ETAS-е. В методе устанавливается иерархия последовательности афтершоков, в которой однозначно выделяются афтершоки фоновых событий, афтершоки афтершоков, их афтершоки и т.д. В модели

ETAS-е такие иерархические последовательности синтезируются. Таким образом обеспечивается максимальное соответствие “афтершоковой” части в синтетическом и реальном каталогах.

В методе Заляпина–Бен-Зиона выделяются пары связанных событий, одно из которых считается триггером (или “родителем”), а другое иницируемым событием (или “потомком”); потомок всегда возникает позже родителя. Каждое событие может иметь несколько потомков, но не более одного родителя. Степень связанности событий в пространстве–времени–магнитуде для событий с индексами i и j определяется значениями функции близости [Baiesi, Paczuski, 2004]:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} t_{ij}(r_{ij})^{d_f} 10^{-bm_i}, & t_{ij} > 0, \\ +\infty, & t_{ij} \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где t_{ij} – время между событиями (сутки), r_{ij} – расстояние между эпицентрами, d_f – фрактальная размерность пространственного распределения землетрясений, b – параметр закона Гутенберга–Рихтера (b -value), m_i – магнитуда события i . События считаются связанными, если $\eta_{ij} \leq \eta_0$.

Пороговая величина η_0 оптимально разделяет независимые и связанные события. Значение η_0 определяется по представленному в работе [Shebalin et al., 2020] методу, в котором распределение функции близости для независимых событий моделируется путем случайного перемешивания времен событий относительно их координат гипоцентра и магнитуд. Каталог фоновых событий формируется из событий в исходном каталоге, для которых значение функции близости относительно любого события $\eta_{ij} > \eta_0$ (то есть событие не имеет “родителя”).

Построение модели параметров сейсмического режима фоновых землетрясений

В отличие от методики построения карт ОСР-97, ОСР-2015 и ОСР-2016, мы не используем данные об активных разломах, опираясь исключительно на данные каталога землетрясений. Более того, даже результаты распознавания возможных мест сильных землетрясений

по методике FCAZ [Gvishiani et al., 2022b], используемые в данной работе, также основаны исключительно на данных каталога землетрясений.

Для построения локальных оценок параметров закона Гутенберга–Рихтера использован метод среднего положения (МСП) [Vorobieva et al., 2024; Shebalin et al., 2024]. Регион сканируется кругами с постоянным радиусом R с центрами в узлах регулярной сетки с шагом D по широте и долготе. В каждом круге подсчитывается число событий $N_{i,j}$ с $M \geq M_c$ (M_c – представительная магнитуда) или оценивается значение параметра b закона Гутенберга–Рихтера. Для оценки параметра b диаметр кругов должен как минимум в 5 раз превышать размер очага сильнейшего события в исследуемом диапазоне магнитуды [Крушельницкий и др., 2024]. Радиус круга для подсчета числа событий с $M \geq M_c$ обычно выбирается вдвое меньшим.

Главная особенность МСП состоит в том, что значения оцениваемого параметра приписываются не центру круга, а среднему положению землетрясений из выборки. Вторая важная особенность – учет неравномерности пространственного распределения эпицентров (фрактальности). Для подсчета числа событий в пространственной ячейке в единицу времени $\lambda_{i,j}$ используется следующая нормировка [Vorobieva et al., 2024]:

$$\lambda_{i,j} = \frac{1}{T} N_{i,j} \frac{S_{cell}}{S_{circle}}, \quad (2)$$

где $S_{circle} = R^{d_f^b} \frac{\pi d_f^b / 2}{\Gamma(1 + d_f^b / 2)}$ и $S_{cell} = D^{d_f^b} \cos(\varphi)$ –

площади круга и ячейки в d_f^b -мерном пространстве; φ – широта центра ячейки; Γ – гамма-функция; R – радиус круга; d_f^b – фрактальная размерность пространственного распределения эпицентров фоновых землетрясений. В некоторые ячейки попадет несколько значений $\lambda_{i,j}$ – в этом случае выбирается максимальное. В некоторые ячейки не попадает ни одно значение – в них значения $\lambda_{i,j}$ определяются путем интерполяции криволинейными сплайнами с помощью встроенной процедуры “Surface” пакета Generic Mapping Tool [Wessel et al., 2019].

Параметр b оценивается, если число событий в круге составляет 50 или более. В противном случае используется региональная оценка параметра b . Оценивание проводится методом максимального правдоподобия для группированных данных с ограниченным максимумом магнитуды [Bender, 1983]. Этот метод дает несмещенную оценку для выборок небольшого объема. Полученные оценки также приписываются среднему положению эпицентров, в случае нескольких оценок выбирается сделанная по максимальному числу событий.

Оценка параметров афтершоков

Данных для проведения локальных оценок параметров афтершоков, кроме продуктивности, обычно недостаточно, поэтому для параметров s и p закона Омори–Утсу и параметра b_{aff} закона Гутенберга–Рихтера выполняются региональные оценки.

Для оценки параметров закона Омори–Утсу составляется общий каталог времен афтершоков относительно их “родителей” в схеме Заляпина–Бен-Зиона. Параметры определяются методом, представленным в работе [Holschneider et al., 2012]. Оценка параметра b_{aff} проводится методом, представленным в работе [Bender, 1983], для всех афтершоков.

Средняя дельта-продуктивность $\Lambda_{\Delta M}$ [Shebalin et al., 2020] также оценивается локально методом среднего положения. В кругах радиуса R_Λ подсчитывается среднее число “потомков” по схеме Заляпина–Бен-Зиона для каждого события с эпицентром в этом круге, а значения приписываются среднему положению эпицентров. Потомки не обязательно должны иметь эпицентры в круге. Магнитуда потомков ограничена снизу величиной, на ΔM меньшей магнитуды “родителя”. Если в ячейку (i,j) попадает несколько значений, выбирается максимальное. Пустым ячейкам приписывается региональное значение.

Генерация синтетического каталога фоновых событий

Формирование синтетического каталога производится с помощью генератора случайных чисел с заданным распределением. Для каждого фонового события сначала синтезируется

время в соответствии с распределением Пуассона с параметром, равным региональному числу событий в единицу времени с $M \geq M_0$. Затем для этого события синтезируется значение магнитуды в соответствии с региональным магнитудно-частотным распределением. Стандартно принимается модель Гутенберга–Рихтера в пределах $M_0 \leq M \leq M_{\max}$. Магнитуда определяется с точностью 0.1.

Для определения координат гипоцентра используется трехмерная таблица интенсивности событий заданной магнитуды $\lambda_{i,j,m}$, пересчитанная из двумерных таблиц $\lambda_{i,j}$ и $b_{i,j}$. Здесь третий индекс соответствует магнитуде. Поскольку в данной работе вводятся ограничения на возможное положение эпицентров землетрясений с $M \geq 5.5$, определяемые результатами FCAZ-распознавания, то значения в ячейках трехмерной таблицы, соответствующие значениям магнитуды $M \geq 5.5$, обнуляются. Для всех значений магнитуды интенсивность нормируется так, чтобы сумма по пространственным элементам (i,j) для каждого значения магнитуды равнялась единице. Генерируется случайная величина с равномерным распределением на интервале $(0,1)$. По этому значению находится ячейка (i,j) . Затем более точное положение определяется в предположении равномерного распределения эпицентров внутри ячейки.

Глубина очага синтезируется аналогично работе [Малютин и др., 2024] по распределению Вейбулла с параметрами, определенными для всего региона.

Генерация полного синтетического каталога с афтершоками

Генерация афтершоков в синтетическом каталоге осуществляется по модели ETAS-е [Shebalin et al., 2020] для каждого события из каталога фоновых землетрясений. Для этого последовательно генерируются непосредственные афтершоки: сначала самого события, на второй итерации – афтершоки непосредственных афтершоков и т.д. Времена между ними определяются в соответствии со свойством Пуассоновского потока событий. Генерируется случайная величина u , имеющая равномерное распределение в интервале $(0,1)$. Время между событием i и первым непосредственным афтершоком t_{i1} определяется как $t_{i1} = -\ln(u)c^p / f(M_i)$, где $f(M_i)$ –

интенсивность потока афтершоков в момент события i . В соответствии с законом продуктивности [Shebalin et al., 2020, 2022] величина $f(M_i)$ сама является случайной и имеет экспоненциальное распределение. Среднее значение величины $f(M_i)$ находится из соотношения

$$\Lambda_{\Delta M} 10^{b_a(M_m - M_c - \Delta M)} = \int_{t_i}^{t_i+T} \frac{f(M_i)}{(t - t_i + c)^p} dt = \int_0^T \frac{f(M_i)}{(t + c)^p} dt = f(M_i) [u(T + c) - u(c)], \quad (3)$$

$$\text{где } u(x) = \begin{cases} \ln(x), & p = 1 \\ \frac{x^{1-p}}{1-p}, & p \neq 1 \end{cases}.$$

Для определения времени следующего афтершока генерируется новое значение u . Время второго афтершока от момента инициирующего землетрясения определяется как $t_{i2} = t_{i1} - \ln(u)(c + t_{i1})^p / f(M_i)$.

Итерации продолжают (для каждого нового “родителя” генерируется новое значение функции $f(M_i)$), пока время нового афтершока не превысит значение T . Мы используем значение $T = 365$ сут. Часто оказывается, что у события i нет ни одного афтершока, благодаря чему вся процедура конечна.

Пространственные координаты эпицентра афтершока генерируются следующим образом. По формуле из работы [Wells, Coppersmith, 1994] рассчитывается площадь области афтершоковой активности:

$$S(\text{км}^2) = 10^{-3.49+0.91M_i}. \quad (4)$$

Затем вычисляются величины:

$$L1(\text{км}) = 0.5 \times 10^{-2.44+0.59M_m}, \quad (5)$$

$$L2(\text{км}) = S/L1/\pi.$$

Обычно $L1 > L2$, но возможна и обратная ситуация, поэтому далее мы оперируем величинами $L_{\max} = \max(L1, L2)$ и $L_{\min} = \min(L1, L2)$. Координаты эпицентра афтершока случайно генерируются как двумерная нормально распределенная случайная величина со стандартными отклонениями, соответствующими значениям большей ($L_{\max}$) и меньшей ($L_{\min}$) полуосям эллипса, ориентированного вдоль ближайшего

разлома из базы данных активных разломов ГИН РАН [Zelenin et al., 2022], и средними, равными координатам основного толчка. Если же направления разломов равноправны, то область имеет форму круга и координаты афтершока генерируется по двумерному нормальному распределению со стандартными отклонениями, равными радиусу круга $R[\text{км}] = (S/\pi)^{0.5}$, и средними, равными координатам основного толчка.

Верификация моделей

Чтобы проверить, действительно ли синтетический каталог моделирует реальный каталог землетрясений, в работе [Shebalin et al., 2024] было предложено использование L -теста [Zechar et al., 2010] и его модификаций, основанных на функции правдоподобия. Функция правдоподобия определяет совместную вероятность реальных событий, произошедших в соответствующих ячейках. Правдоподобие определяется как произведение по всем элементам пространства–магнитуды вероятностей реализации в них фактически наблюдаемого числа событий. Обычно используется логарифмическая функция правдоподобия:

$$L = \sum_{i,j,m} \ln[f_{ijm}(\omega(i,j,m))], \quad (6)$$

где $\omega(i,j,m)$ – число реализаций землетрясений в интервале магнитуды m и в элементе пространства (i,j) за период времени T ; $f_{ijm}(k)$ – вероятность k реализаций землетрясений за период T в ячейке пространства–магнитуды. При использовании синтетического каталога вероятность может быть рассчитана как частота реализаций значений k при разбиении каталога на интервалы длительности T . Чтобы понять по значению L , соответствует ли синтетический каталог реальным данным, можно путем многократного применения формулы (6) к непере-секающимся частям синтетического каталога землетрясений длительностью T каждый построить распределение величины L . По распределению оценивается доля γ случаев, в которых значение правдоподобия по синтетическому каталогу меньше, чем по реальному. Очень маленькое значение γ указывает на то, что модель не согласуется с наблюдениями (на доверительном уровне $100(1-\gamma)\%$). Значение $\gamma \sim 50\%$ означает хорошее согласование модели с реальными данными, по которым она построена.

Поскольку наибольший ущерб возникает от сильнейших землетрясений, важной дополнительной проверкой является сравнение положения эпицентров сильных землетрясений прошлого с положением эпицентров в синтетическом каталоге.

РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Детальное изучение сейсмичности Восточного сектора АЗРФ началось сравнительно недавно. Из-за малой плотности населения, отсутствия в досоветский период письменности у многих населяющих его народов в регионе очень мало свидетельств проявления землетрясений в прошлом. Фактически “сейсмическая история” региона начинается лишь с XX-го столетия. Наиболее детальная информация о сильных землетрясениях в регионе собрана в работах [Новый каталог ..., 1977; New Catalog ..., 1982] (в англоязычной версии каталога данные дополнены до 1981 г.). В более поздний период в регионе произошло около десятка землетрясений магнитудой 6.0 и более. Два из них были неожиданностью с точки зрения карт ОСР, что привело к существенной коррекции карт именно в рассматриваемом регионе (см. рис. 1). Это Олюторское землетрясение с $M = 7.6$ [Chebrov, 2010; Lander et al., 2010; Rogozhin et al., 2010] и Илин-Тасское (Абыйское) землетрясение с $M = 6.7$ [Shibaev et al., 2020]. Совместному анализу тектоники, геодинамики и сейсмичности в регионе в последние годы посвящен целый ряд исследований [Имаев и др., 2020; Imaeva et al., 2019; Daragan-Sushchova et al., 2015; Kanao et al., 2015].

В качестве исходных данных в работе мы использовали наиболее полный и представительный каталог землетрясений с однородной магнитудной шкалой [Gvishiani et al., 2022a], созданный путем системно-аналитического алгоритмического объединения [Vorobieva et al., 2022] данных различных каталогов и исследования соотношений разных шкал магнитуды и энергетического класса. Каталог содержит информацию о 23 254 сейсмических событиях за период с 1962 по 2020 гг. Он находится в открытом доступе на сайте Мирового центра данных по физике твердой Земли (http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/arctic_seism.html).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Выделение в объединенном каталоге [Gvishiani et al., 2022a] фоновых землетрясений и иерархических цепочек афтершоков по схеме Заляпина–Бен-Зиона было проведено в работе [Воробьева и др., 2024]. Для этого был выбран период каталога, в котором данные можно считать однородными. В период до 1982 г. магнитуды большинства событий были пересчитаны из целочисленных энергетических классов и имеют шаг дискретизации 0.5, поэтому для анализа был выбран период с 1982 по 2020 г. Оценка представительной магнитуды для этого периода составляет $M_c = 4.0$. Для фрактальной размерности и параметра закона Гутенберга–Рихтера получены оценки $d_f = 1.81$ и $b = 0.924$. По методике, представленной в работе [Shebalin et al., 2020], определено пороговое значение функции близости $lg\eta_0 = -0.61$. В каталоге по схеме Заляпина–Бен-Зиона выделены пары “родитель”–“потомок”. В отдельный каталог записаны фоновые события, не имеющие “родителя”. Каталог включает 371 событие с $M \geq M_c = 4.0$.

Модель параметров сейсмического режима фоновых землетрясений также была построена в работе [Воробьева и др., 2024]. Проведена необходимая для этого оценка фрактальной размерности и параметра b закона Гутенберга–Рихтера, получены региональные значения $d_f^b = 1.88$ и $b = 0.9$. Для локальных оценок $\lambda_{i,j}$ по методу МСП использовались круги радиусом $R = 200$ км, для интерполяции в кругах без эпицентров принималось значение $\lambda_{i,j} = 10^{-5}$ год $^{-1}$. Оценки $b_{i,j}$ проводились в кругах радиусом $R_b = 300$ км при минимальном количестве событий 50. При меньшем числе событий принималось региональное значение $b = 0.9$.

Как было показано в работе [Воробьева и др., 2024], даже простой расчет числа землетрясений с $M \geq 6$ по таблицам $\lambda_{i,j}$ и $b_{i,j}$ достаточно хорошо отражает возможные места таких землетрясений: большинство эпицентров землетрясений с $M \geq 6$, в том числе за период с 1900 по 1981 г., не учитывавшийся при построении модели, располагаются в локальных зонах высоких значений $\lambda_{i,j}$ $M \geq 6$. Однако площадь таких зон слишком велика, вследствие чего из-за необходимости соблюдения региональной повторяемости сильных землетрясений локальные оценки оказываются заниженными.

В данной работе увеличение контрастности зон возможного возникновения сильных землетрясений достигается путем использования результатов FCAZ-распознавания [Gvishiani et al., 2022b]. Зоны, в которых в соответствии с этими результатами возможны эпицентры землетрясений с $M \geq 5.5$, показаны на рис. 2. При расчете трехмерной нормированной таблицы $\lambda_{i,j,m}$ значения вне зон FCAZ обнуляются, благодаря чему, с учетом перенормировки, оценки повторяемости сильных землетрясений внутри зон увеличиваются.

Параметры закона Омори–Утсу оценивались на интервале (0.001, 100) сут (рис. 3). Получена устойчивая оценка $c = 0.0128$, $p = 1.09407$ (см. рис. 3а); модель с такими параметрами хорошо воспроизводит реальное распределение времен непосредственных афтершоков (см. рис. 3б).

Локальные оценки продуктивности для $\Delta M = 1.0$ проводились методом МСП в кругах радиусом $R_\Delta = 300$ км (рис. 4). Если число событий в круге оказывалось 5 или менее, то продуктивности присваивалось среднее значение 0.6. Высокие значения продуктивности наблюдаются на севере Камчатки и в районе Чукотки.

Синтетический каталог фоновых событий

Для оценки сейсмической опасности и, в частности, для построения карт ОСР используются

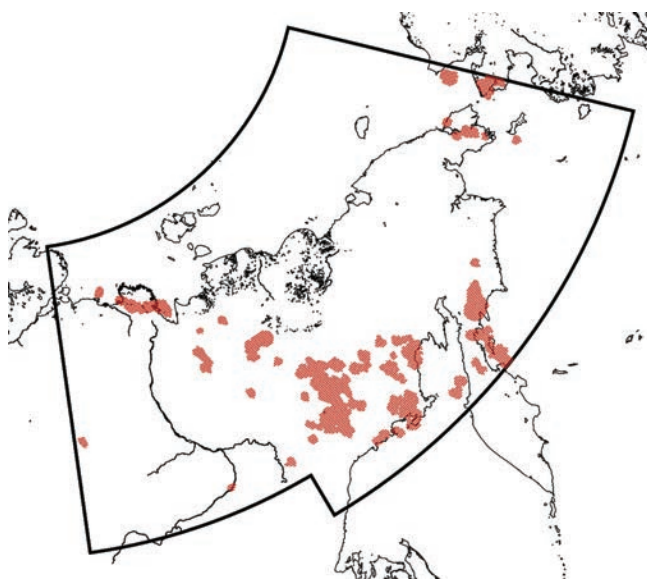


Рис. 2. Зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$, определенные методом FCAZ-распознавания [Gvishiani et al., 2022b].

Зоны FCAZ показаны красной штриховкой. Сплошной контур показывает границы рассматриваемого региона.

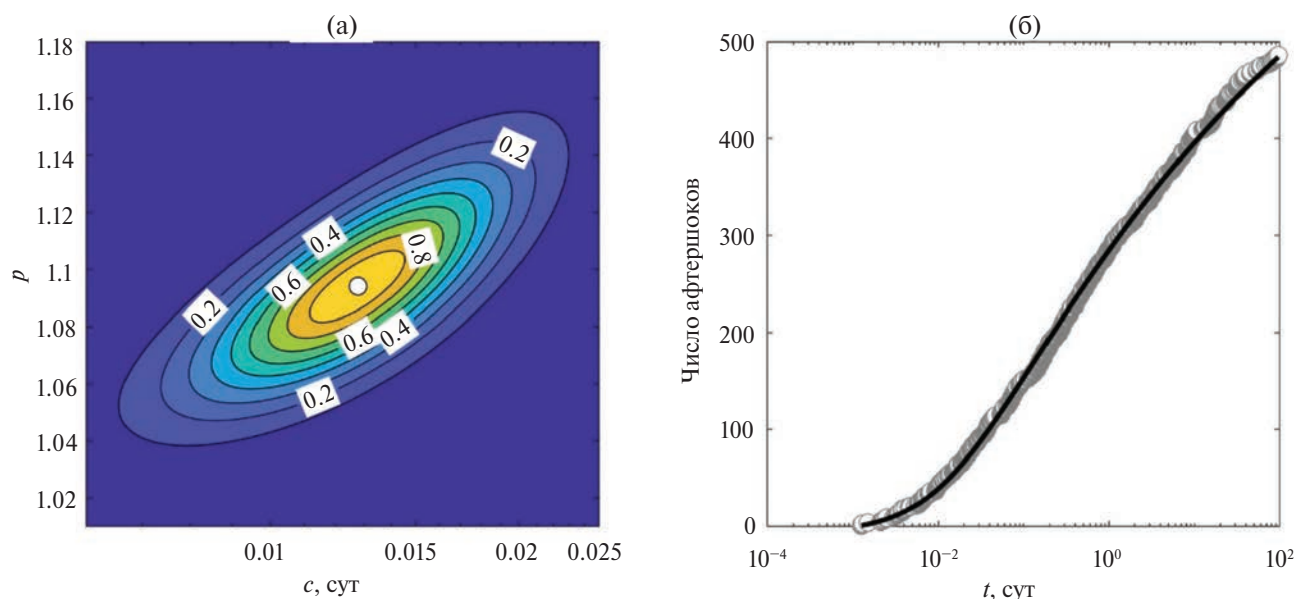


Рис. 3. Оценка параметров c и p закона Омори–Утсу для всех пар “родитель”–“потомок” в каталоге, размеченном по схеме Заляпина–Бен-Зиона.

а – апостериорное распределение байесовских оценок c и p : контурами с маркерами показаны линии уровня квантилей, белым кружком отмечено положение максимума правдоподобия; б – распределение времен афтершоков: кружками обозначено эмпирическое распределение по парам “родитель”–“потомок”, сплошной линией – теоретическое распределение по закону Омори–Утсу.

модели затухания. Интенсивность воздействия от землетрясения с определенными параметрами зависит не только от расстояния до эпицентра, но и от глубины очага. Поэтому важной характеристикой очага землетрясения является его глубина. В данной работе мы моделируем распределение глубины очага распределением Вейбулла

$f(h) = \frac{B}{A} \left(\frac{h}{A} \right)^{B-1} e^{-\left(\frac{h}{A} \right)^B}$ аналогично работе [Малютин и др., 2024]. Это распределение лучше других рассмотренных вариантов аппроксимирует эмпирическое распределение (рис. 5). Получены оценки параметров распределения Вейбулла $A = 14.7$, $B = 1.81$.

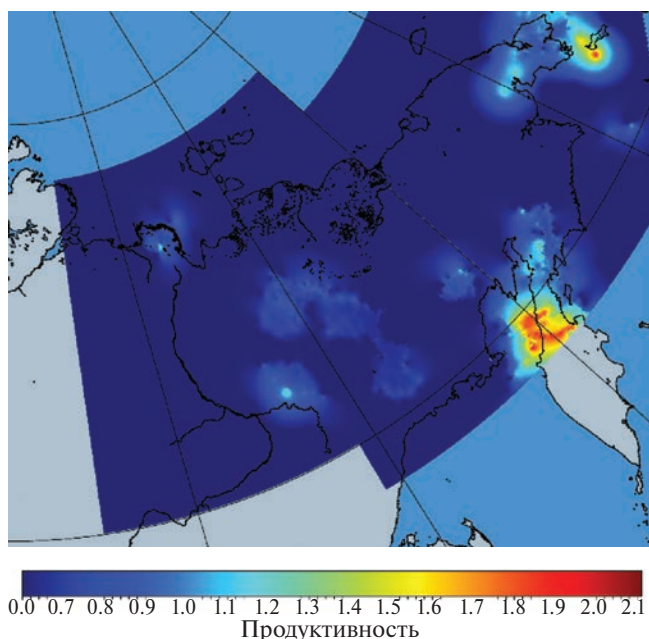


Рис. 4. Локальные оценки средней продуктивности землетрясений $\Lambda_{\Delta M}$ при $\Delta M = 1$ методом СМП.

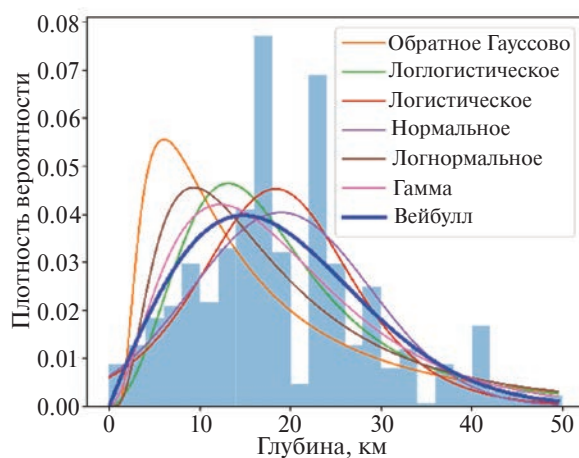


Рис. 5. Гистограммы функции плотности вероятности распределения глубин очага землетрясений с рассмотренными вариантами аппроксимаций. Наилучшая аппроксимация достигается распределением Вейбулла.

По методике, описанной в разделе “Генерация синтетического каталога фоновых событий”, сгенерирован каталог фоновых землетрясений, который содержит 189 552 землетрясения с магнитудой $M \geq 4$. Использована модель сейсмического режима в виде таблицы параметров $\lambda_{i,j,m}$, пересчитанной из двумерных таблиц $\lambda_{i,j}$ и $b_{i,j}$, рассчитанных ранее в работе [Воробьева и др., 2024]. Для землетрясений с $M \geq 5.5$ положение эпицентров ограничено областью, выделенной по результатам FCAZ-распознавания [Gvishiani et al., 2022b].

Полный синтетический каталог был сгенерирован на основе синтетического каталога фоновых событий по методике, описанной в разделе “Генерация полного синтетического каталога с афтершоками”. Всего в каталоге представлены данные о 471 416 землетрясениях, произошедших за последние 20 тыс. лет, 281 864 из которых — афтершоки. Общая доля афтершоков, таким образом, составляет 60% от общего числа событий, что близко аналогичному значению в реальном каталоге, равному 65%. Небольшое различие может быть связано с недооценкой значений продуктивности из-за временного локального увеличения уровня представительной магнитуды в области сильных землетрясений [Shebalin, Baranov, 2017].

По методике, описанной в разделе “Верификация моделей”, была проведена верификация двух вариантов синтетического каталога: только фоновых событий и полного.

В первом случае была рассчитана логарифмическая функция правдоподобия $L = -3211.2$ для фоновых землетрясений из реального каталога с магнитудой $M \geq 4$. Значения функции $f_{ijm}(k)$ в формуле (6) рассчитывались из распределения Пуассона с параметром, равным значению в соответствующей ячейке трехмерной таблицы λ_{ijm} , нормированной на общее число событий. Чтобы оценить, насколько модель соответствует реальности, синтетический каталог фоновых событий разделен на отрезки длительностью 39 лет (это длительность фактического каталога) и по каждому отрезку, как по фактическому каталогу, определено значение L . Гистограмма полученных значений приведена на рис. 6а. Как видно из этого рисунка, значение L -теста лежит вблизи медианы распределения значений L по синтетическому каталогу. Это говорит об очень хорошем соответствии модели фактическим данным.

Для полного каталога теоретические значения функции $f_{ijm}(k)$ рассчитать очень сложно, поэтому были использованы значения частоты реализации значения k в ячейках пространства-времени-магнитуды в 512 вариантах отрезков синтетического каталога ($20000/39 = 512.82$). Для реального каталога значение L -теста составило -4776.1 .

В качестве дополнительного теста в данной работе было проведено сравнение положения эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$ в реальном

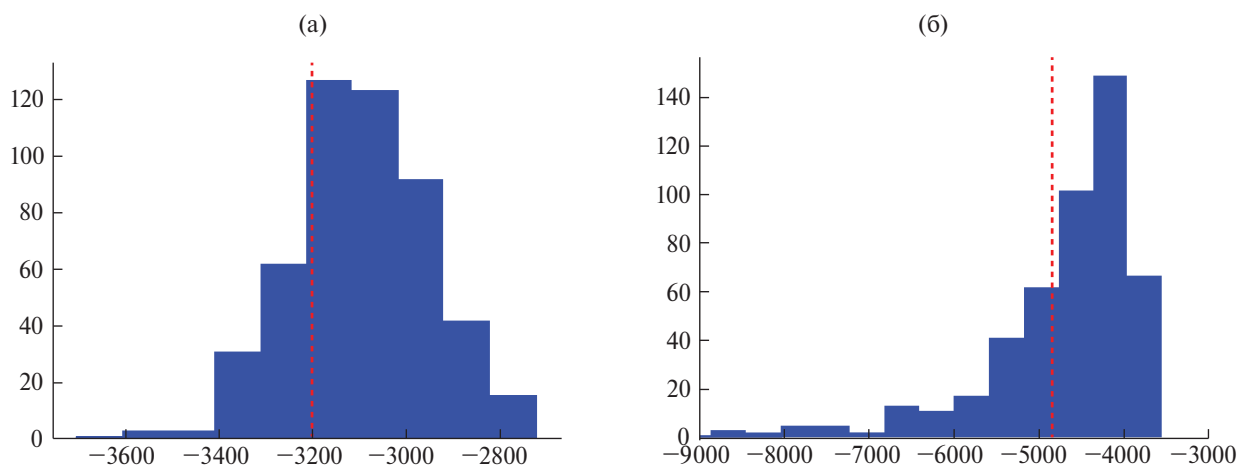


Рис. 6. Результаты верификации синтетического каталога землетрясений по фактическому каталогу согласно L -тесту. а — синтетический и реальный каталоги фоновых землетрясений, б — синтетический и реальный полные каталоги. Показаны гистограммы L -теста для отрезков синтетического каталога, вертикальной штриховой линией показано значение L -теста по реальному каталогу; гистограммы построены по реализациям L -теста одинаковой длительности (39 лет), равной длительности реального каталога, в которых реальный каталог заменяется выборкой из синтетического каталога.

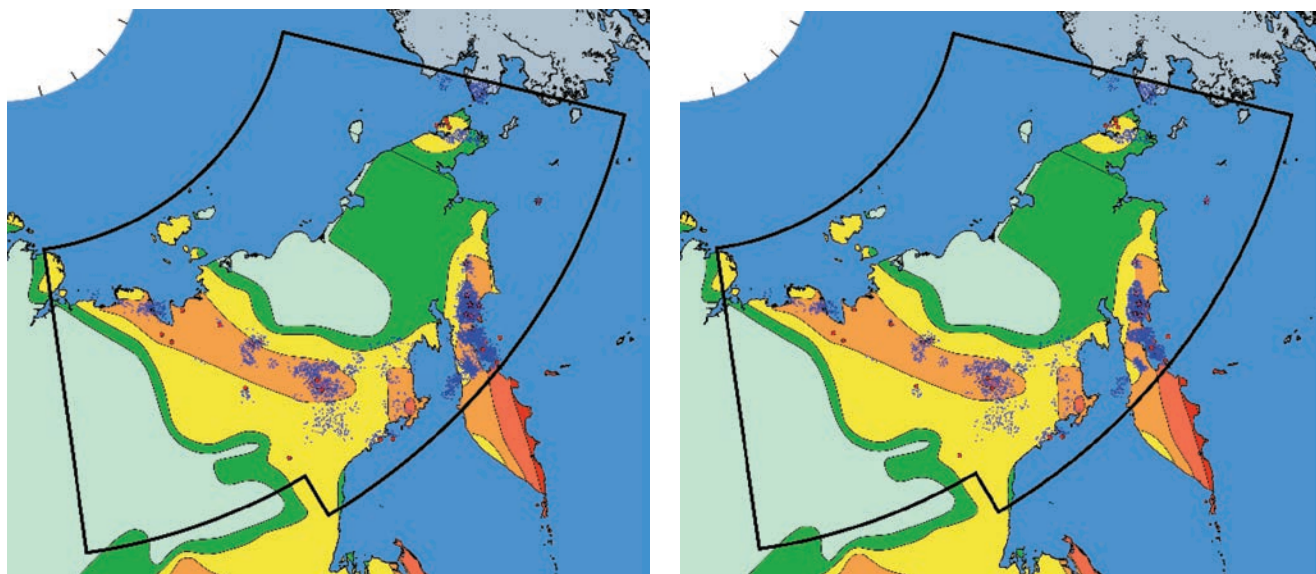


Рис. 7. Сравнение положений эпицентров с $M \geq 6.0$ в реальном и синтетическом каталогах. В качестве подложки использованы зоны нормативной балльности по карте ОСР-2015А (обозначения цветов см. на рис. 1). Синими точками обозначены эпицентры из синтетического каталога за 20 000 лет (на карте слева – все события, на карте справа – только фоновые), красными кружками – фактические эпицентры за 1900–1981 гг. [New Catalog ..., 1982], звездочками – фактические эпицентры за 1982–2020 гг. Рамкой показаны границы рассматриваемого региона.

и синтетическом каталогах (рис. 7). Как видно из этого рисунка, лишь небольшая доля эпицентров сильных землетрясений прошлого оказалась вне зон проявления сильных землетрясений в синтетическом каталоге. Эти землетрясения сосредоточены на севере Якутии и на севере Чукотки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

С использованием интегрированного каталога Восточного сектора АЗРФ [Gvishiani et al., 2022a] определены параметры сейсмического режима для региона в пределах 57.5° – 77° с.ш., 110° в.д.– 165° з.д. Проведена оценка параметров не только фоновых землетрясений, но и афтершоков. Это позволило сгенерировать синтетический каталог землетрясений, который воспроизводит те же значения параметров. Результаты L -теста свидетельствуют о хорошем соответствии синтетического каталога реальному, как в части только фоновых событий, так и в целом.

Синтетический каталог создавался и при подготовке карт ОСР-97, ОСР-2015, ОСР-2016. Главные отличия данного синтетического каталога состоят в следующем:

- 1) синтетический каталог сгенерирован по данным только каталога землетрясений и их строго алгоритмической обработки без использования

модели линеаментов и доменов, основанной на экспертных решениях;

- 2) места возможных сильных землетрясений также определены по данным исключительно каталога землетрясений по строгому алгоритму системного анализа без привлечения экспертных оценок;
- 3) синтетический каталог содержит в качестве одного из параметров время событий;
- 4) каталог моделирует афтершоковую активность.

В современных условиях уже имеющихся инструментальных данных о землетрясениях за несколько десятков лет, в рамках вероятностного подхода к оценке общей сейсмической опасности, по-видимому, нет необходимости в использовании дополнительных данных, в частности об активных разломах, главный недостаток которых состоит в недостаточной степени объективности. Данная работа является одной из первых попыток построения модели сейсмичности, основанной на расчетах по четкому и воспроизводимому алгоритму системного анализа.

Было бы закономерно сравнить действующие карты ОСР с аналогичными картами, построенными по сгенерированному синтетическому каталогу. Мы пока не ставили такую задачу, так как ее решение в значительной степени зависит

от выбора модели затухания, а точное воспроизведение модели, использованной в ОСР-2015, не представляется возможным. Тем не менее были сделаны предварительные оценки с использованием уравнений макросейсмического поля Н.В. Шебалина с коэффициентами, приведенными в работе [Новый каталог ..., 1977]. Чтобы избежать дискуссий на основе неполной информации, не касающихся сути данной работы, мы приводим здесь лишь расчеты площадей зон каждого нормативного балла, рассчитанного для вероятности превышений 10% за 50 лет (табл. 1). Для удобства сравнения в табл. 1 приводятся кумулятивные значения площадей (сумма площади зон данного и более высоких баллов). Расчеты направлены на то, чтобы выяснить, в какой степени разные элементы модели построения синтетического каталога влияют на расчеты ожидаемой балльности. Мы сравнили три варианта синтетического каталога (см. табл. 1): 1) каталог фоновых событий на основе оценки параметров сейсмического режима (этот каталог был получен в работе [Воробьева и др., 2024]); 2) каталог фоновых событий, в котором места сильных землетрясений ограничены результатами FCAZ-распознавания [Gvishiani et al., 2022b]; 3) полный каталог, описанный выше.

Как и следовало ожидать, максимальное отличие наблюдается при переходе от первого ко второму варианту. Сужение области, в которой возможны эпицентры самых сильных землетрясений, перераспределяет ожидаемую

Таблица 1. Оценки доли площади зон внутри рассматриваемой территории, в которых с вероятностью 10% за 50 лет ожидается превышение заданного балла макросейсмической интенсивности, от общей рассматриваемой площади

	ОСР2015-A ¹	Вариант 1 ²	Вариант 2 ²	Вариант 3 ²
VI	65.68	34.50	27.20	29.06
VII	41.57	5.52	7.52	9.09
VIII	13.28	1.48	1.70	2.46
IX	0.47	0.00	0.34	0.59

Примечание. 1 — доли площади нормативного балла на карте ОСР-2015-A от общей площади рассматриваемой территории; значения просуммированы от низшего балла к высшему; 2 — вероятности превышения рассчитаны по частоте расчетного воздействия (по уравнениям макросейсмического поля Н.В. Шебалина с коэффициентами из работы [Новый каталог ..., 1977]) от землетрясений соответствующего варианта синтетического каталога.

повторяемость таких событий, в результате чего в “разрешенных” местах ожидаемая повторяемость возрастает. Различие двух вариантов карт значимо именно в таких местах. Переход от второго варианта к третьему дает не столь значительные различия. Однако они тоже весьма существенны, в особенности для высоких баллов. Для понимания причин такого расхождения мы приводим карты эпицентров “синтетических” землетрясений с $M \geq 6.0$: всех (рис. 7, слева) и только фоновых (рис. 7, справа). Можно видеть, что афтершоки не только увеличивают суммарную повторяемость землетрясений с $M \geq 6.0$, но и несколько расширяют зону распространения их эпицентров.

Получен и другой важный результат: предварительные оценки значительно уменьшают площади территорий, отвечающих каждому нормативному баллу от VI до VIII на карте ОСР-2015, что является желательным результатом с учетом обнаруженным недавно их значительным завышением [Шебалин и др., 2022].

Синтетический каталог может и должен быть использован для построения карт ОСР. При этом сгенерированный в данной работе каталог включает фактор времени. Это позволит получать на его основе более точные оценки сейсмического риска, учитывающие пространственные корреляции сейсмических воздействий [Шебалин и др., 2024].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 21-77-30010 “Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воробьева И.А., Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Дзеранов Б.В. Параметры сейсмического режима восточного сектора Арктической зоны Российской Федерации // Физика Земли. 2024. № 5. С. 3–21.

Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзедобоев Б.А. Проблема распознавания мест возможного возникновения

- сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли. 2020. № 1. С. 5–29.
<https://doi.org/10.31857/S0002333720010044>
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. О критериях высокой сейсмичности // Докл. АН СССР. 1972. Т. 202. № 6. С. 1317–1320.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сильное Улахан-Чистайское землетрясение 20 января 2013 года ($M_s = 5.7$) в зоне влияния системы разлома Улахан на Северо-Востоке России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. Т. 65. Вып. 4. С. 740–759.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.408>
- Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб: 1 : 8 000 000 / Главные редакторы: В.Н. Страхов, В.И. Уломов. М.: Объединенный институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 1999. 4 л.
- Крушельницкий К.В., Шебалин П.Н., Воробьева И.А., Селюцкая О.В., Антипова А.О. Границы применимости закона Гутенберга–Рихтера в задачах оценки сейсмической опасности и риска // Физика Земли. 2024. № 5. С. 69–84.
- Малютин П.А., Скоркина А.А., Воробьева И.А., Баранов С.В., Маточкина С.Д., Молокова А.П., Шебалин П.Н. Характерное распределение глубин коровых землетрясений Южной Сибири // Физика Земли. 2024. № 4. С. 50–63.
<https://doi.org/10.31857/S0002333724040046>
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 536 с.
- Пояснительная записка к комплексу карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах / Гл. ред. В.И. Уломов, М.И. Богданов // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–60.
- Ризниченко Ю.В. Сейсмический режим и сейсмическая активность // Сейсмическое районирование территории СССР / Под ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшкова. М.: Наука, 1980. С. 47–58.
- Шебалин Н.В. Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии) // Магнитное поле Земли: математические методы описания. Проблемы макросейсмики. М.: ГЕОС, 2003. (Вычислительная сейсмология, Вып. 34). С. 57–200.
- Шебалин П.Н. Современные подходы к сокращению ущерба от землетрясений // Вестник РАН. 2024. Т. 94. № 8. С. 738–748.
- Шебалин П.Н., Тихоцкий С.А., Коваленко А.А. О совершенствовании подходов к сокращению ущерба от землетрясений // Вестник РАН. 2024. Т. 94. № 10. С. 900–909.
- Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 91–97.
<https://doi.org/10.31857/S2686739722601466>
- Akinci A., Moschetti M.P., Taroni M. Ensemble smoothed seismicity models for the new Italian probabilistic seismic hazard map // Seismological Research Letters. 2018. V. 89. № 4. P. 1277–1287.
<https://doi.org/10.1785/0220180040>
- Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Physical Review E. 2004. V. 69. Iss. 6. P. 066106-1–066106-8.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066106>
- Baranov S.V., Gvishiani A.D., Narteau C., Shebalin P.N. Epidemic type aftershock sequence exponential productivity // Russian Journal of Earth Sciences. 2019. V. 19. Iss. 6. ES6003.
<https://doi.org/10.2205/2019ES000695>
- Baranov S.V., Narteau C., Shebalin P.N. Modeling and Prediction of Aftershock Activity // Surveys in Geophysics. 2022. V. 43. P. 437–448.
<https://doi.org/10.1007/s10712-022-09698-0>
- Bender B. Maximum likelihood estimation of b -values for magnitude grouped data // Bulletin of the Seismological Society of America. 1983. V. 73. P. 831–851.
- Chebrov V.N. The Olyutorskii earthquake of April 20, 2006: Organizing surveys, observations, problems, and results // Journal of Volcanology and Seismology. 2010. V. 4. № 2. P. 75–78.
<https://doi.org/10.1134/S0742046310020016>
- Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. 1968. V. 58. Iss. 5. P. 1583–1606.
- Daragan-Sushchova L.A., Petrov O.V., Sobolev N.N., Daragan-Sushchov Y.I., Grin'ko L.R., Petrovskaya N.A. Geology and tectonics of the northeast Russian Arctic region, based on seismic data // Geotectonics. 2015. V. 49. P. 469–484.
<https://doi.org/10.1134/S0016852115060023>
- Dzoboev B.A., Gvishiani A.D., Agayan S.M., Belov I.O., Karapetyan J.K., Dzeranov B.V., Barykina Y.V. System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 17. 7972.
<https://doi.org/10.3390/app11177972>
- Gardner J.K., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // Bulletin of the Seismological Society of America. 1974. V. 64. P. 1363–1367.

- Gerstenberger M.C., Marzocchi W., Allen T., Pagani M., Adams J., Danciu L. et al.* Probabilistic seismic hazard analysis at regional and national scales: State of the art and future challenges // *Reviews of Geophysics*. 2020. V. 58. e2019RG000653.
https://doi.org/10.1029/2019RG000653
- Giardini D., Grunthal G., Shedlock K.M., Zhang P.* The GSHAP Global Seismic Hazard Map // *Annali di Geofisica*. 1999. V. 42. Iss. 6. P. 1225–1228.
https://doi.org/10.4401/ag-3784
- Gutenberg B., Richter C.F.* Frequency of earthquakes in California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1944. V. 34. № 4. P. 185–188.
- Gvishiani A.D., Vorobieva I.A., Shebalin P.N., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Skorkina A.A.* Integrated earthquake catalog of the Eastern sector of the Russian Arctic // *Applied Sciences*. 2022a. V. 12. № 10. 5010.
https://doi.org/10.3390/app12105010
- Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Kedrov E.O., Skorkina A.A., Nikitina I.M.* Strong Earthquake-Prone Areas in the Eastern Sector of the Arctic Zone of the Russian Federation // *Applied Sciences*. 2022b. V. 12. № 23. 11990.
https://doi.org/10.3390/app122311990
- Helmstetter A., Werner M.J.* Adaptive spatiotemporal smoothing of seismicity for long-term earthquake forecasts in California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2012. V. 102. № 6. P. 2518–2529.
https://doi.org/10.1785/0120120062
- Holschneider M., Narteau C., Shebalin P., Peng Z., Schorlemmer D.* Bayesian analysis of the modified Omori law // *Journal of Geophysical Research*. 2012. V. 117(B6). B06317.
- Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M.* Dynamics of the Zones of Strong Earthquake Epicenters in the Arctic–Asian Seismic Belt // *Geosciences*. 2019. V. 9. № 4. 168.
https://doi.org/10.3390/geosciences9040168
- Kanao M., Suvorov V., Toda S., Tsuboi S.* Seismicity, structure and tectonics in the Arctic region // *Geoscience Frontiers*. 2015. V. 6. Iss. 5. P. 665–677.
https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.11.002
- Kossobokov V.G., Mazhkenov S.A.* On similarity in the spatial distribution of seismicity // *Computational seismology and geodynamics*. EOS: Transactions, American Geophysical Union. 1994. V. 1. P. 6–21.
- Lander A.V., Levina V.I., Ivanova E.I.* The earthquake history of the Koryak Upland and the aftershock process of the M_w 7.6 April 20(21), 2006 Olyutorskii earthquake // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2010. V. 4. № 2. P. 87–100.
https://doi.org/10.1134/S074204631002003X
- New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from Ancient Times through 1977. Report SE-31 / Editors-in-Chief N.V. Kondorskaya and N.V. Shebalin. Translated and Published by World Data Center A for Solid Earth Geophysics, EDIS, Boulder, Colorado, July 1982. 608 p.
- Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Novikov S.S.* A geological study of the epicentral area of the April 20(21), 2006 Olyutorskii earthquake // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2010. V. 4. № 2. P. 79–86.
https://doi.org/10.1134/S0742046310020028
- Shebalin P., Baranov S.* Long-delayed aftershocks in New Zealand and the 2016 M7.8 Kaikoura earthquake // *Pure and Applied Geophysics*. 2017. V. 174. № 10. P. 3751–3764.
https://doi.org/10.1007/s00024-017-1608-9
- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Earthquake productivity law // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 222. Iss. 2. P. 1264–1269.
https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252
- Shebalin P., Baranov S., Vorobieva I.* Earthquake Productivity Law in a Wide Magnitude Range // *Frontiers in Earth Science*. 2022. V. 10. 881425.
https://doi.org/10.3389/feart.2022.881425
- Shebalin P.N., Baranov S.V., Vorobieva I.A., Grekov E.M., Krushelnitskii K.V., Skorkina A.A., Selyutskaya O.V.* Seismicity Modeling in Tasks of Seismic Hazard Assessment // *Doklady Earth Sciences*. 2024. V. 515. P. 514–525.
https://doi.org/10.1134/S1028334X23603115
- Shibaev S.V., Kozmin B.M., Imaev V.S., Imaeva L.P., Petrov A.F., Starkova N.N.* The February 14, 2013 Ilin-Tas (Abyi) earthquake ($M_w = 6.7$), Northeast Yakutia // *Russian Journal of Seismology*. 2020. V. 2. № 1. P. 92–102.
https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.09
- Spada M., Wiemer S., Kissling E.* Quantifying a potential bias in probabilistic seismic hazard assessment; seismotectonic zonation with fractal properties // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2011. V. 101. № 6. P. 2694–2711.
- Stock C., Smith E.G.C.* Adaptive kernel estimation and continuous probability representation of historical earthquake catalogs // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2002. V. 92. № 3. P. 904–912.
https://doi.org/10.1785/0120000233
- Ulomov V.I.* Seismic hazard of Northern Eurasia // *Annali di Geofisica*. 1999. V. 42. Iss. 6. P. 1023–1038.
https://doi.org/10.4401/ag-3785
- Vorobieva I.A., Grekov E.M., Krushelnitskii K.V., Malyutin P.A., Shebalin P.N.* High Resolution Seismicity Smoothing Method for Seismic Hazard Assessment // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. V. 24. ES1003.
https://doi.org/10.2205/2024ES000892
- Vorobieva I.A., Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Barykina Yu.V., Antipova A.O.* Nearest Neighbor Method for Discriminating Aftershocks and Duplicates When

- Merging Earthquake Catalogs // *Frontiers in Earth Science*. 2022. V. 10. 820277.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.820277>
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture width, Rupture Area, and Surface Displacement // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. V. 84. P. 974–1002.
- Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H.F., Tian D. Generic mapping tools version 6 // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019. V. 20. P. 5556–5564.
<https://doi.org/10.1029/2019gc008515>
- Wyss M., Nekrasova A., Kossobokov V. Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates // *Natural Hazards*. 2012. V. 62. Iss. 3. P. 927–935.
- Zaliapin I., Gabrielov A., Wong H., Keilis-Borok V. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // *Physical Review Letters*. 2008. V. 101. Iss. 1. 018501.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.018501>
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: identification and stability // *Journal of Geophysical Research*. 2013. V. 118. Iss. 6. P. 2847–2864.
<https://doi.org/10.1002/jgrb.50179>
- Zechar J.D., Gerstenberger M.C., Rhoades D.A. Likelihood-based tests for evaluating space–rate–magnitude earthquake forecasts // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010. V. 100. № 3. P. 1184–1195.
<https://doi.org/10.1785/0120090192>
- Zelenin E., Bachmanov D., Garipova S., Trifonov V., Kozhurin A. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. P. 4489–4503.
<https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>
- Zhuang J., Ogata Y., Vere-Jones D. Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences // *Journal of the American Statistical Association*. 2002. V. 97. P. 369–380.
<https://doi.org/10.1198/016214502760046925>

SYNTHETIC EARTHQUAKE CATALOG FOR THE EASTERN SECTOR OF THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION

P. N. Shebalin^{1, 2, *}, A. D. Gvishiani^{1, 3}, P. A. Malyutin², E. M. Grekov²,
 A. O. Antipova^{1, 2}, I. A. Vorobiova^{1, 2}, B. A. Dzeboev^{1, 3}, B. V. Dzeranov¹

¹*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences,
 Molodezhnaya str., 3, Moscow, 119296 Russia*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the Russian Academy of Sciences,
 Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow, 117997 Russia*

³*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
 Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

*e-mail: p.n.shebalin@gmail.com

The synthetic earthquake catalog for the Eastern sector of the Arctic zone of the Russian Federation is constructed in the paper. It reproduces and models the key properties of the catalog of actual earthquakes in the region. At the regional level, the Gutenberg–Richter magnitude frequency law for earthquakes of different magnitudes is satisfied both for the catalog as a whole and for the catalog of main shocks, in which aftershocks are removed. Local values of the parameters of this law are reproduced. The synthetic catalog includes aftershocks, while local ratios of the number of aftershocks and the total number of earthquakes, estimated from the catalog of actual events, are observed. The results of strong earthquake-prone areas recognition using the FCAZ method are used as a model of the spatial distribution of the strongest earthquakes in the region ($M \geq 5.5$). Preliminary calculations of the normative intensity were carried out to compare three variants of the synthetic catalog (full model, without aftershocks, without FCAZ recognition results and aftershocks).

Keywords: seismic mode, model, synthetic earthquake catalog, model verification, L-test, Eastern sector of the Arctic Zone of the Russian Federation, earthquake-prone areas recognition, FCAZ, aftershocks, earthquake productivity

УДК 550.34

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МАГНИТУДАМИ MLH И M_W ДЛЯ КУРИЛО-ОХОТСКОГО РЕГИОНА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ТРАНЗИТНЫХ ПЕРЕСЧЕТОВ В ДРУГИЕ МАГНИТУДЫ

© 2025 г. Д. А. Сафонов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
ул. Науки, 1Б, Южно-Сахалинск, 693022 Россия
e-mail: d.safonov@imgg.ru

Поступила в редакцию 14.08.2024 г.

После доработки 23.09.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

В целях унификации каталога землетрясений Курило-Охотского региона получена двухсегментная линейная зависимость между магнитудой по поверхностной волне MLH Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН и моментной магнитудой M_W агентств GCMT и NIED. Сопоставление с аналогичными формулами по другим каталогам показало, что для сильных землетрясений ($MLH = 6.5–8.1$) отмечается небольшое (~ 0.1) превышение региональной магнитуды MLH над M_S других каталогов. На интервале $4.0–6.5$ MLH превышает значения M_S на $0.2–0.4$. Получены зависимости между MLH и M_L Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН в районе Средних и Северных Курильских островов, а также между MLH и M_j агентства JMA для южной части региона. Транзитным пересчетом с использованием соотношения $MLH(M_W)$ удалось повторить с хорошей точностью непосредственно полученные зависимости. Лучший результат был достигнут при учете различий в определении M_W разными агентствами.

Ключевые слова: землетрясение, магнитудные шкалы, регрессионные соотношения, Курило-Охотский регион

DOI: 10.31857/S0203030625010023, EDN: GIWJWF

ВВЕДЕНИЕ

Магнитуда землетрясения на настоящий момент остается самым простым и распространенным параметром измерения относительной величины сейсмического события. В региональных каталогах землетрясений обычно предпочтение отдается непосредственной оценке магнитуды, полученной сейсмологическим агентством по исходным данным, когда эпицентр землетрясения находится внутри сейсмической сети агентства. Однако ввиду большого количества различных способов определения магнитуды, методических подходов сейсмологических агентств, а также региональных особенностей затухания сейсмической энергии унификация каталогов землетрясений по магнитудному параметру предполагает

использование переходных соотношений между разными шкалами.

В течение длительного времени наиболее авторитетной магнитудной шкалой для сильных и умеренно-сильных землетрясений, анализирующей преимущественно записи телесейсмических сейсмостанций, остается магнитуда по поверхностной волне M_S . В последние десятилетия в связи с развитием различных способов оценки величины сейсмического момента M_0 для все более слабых землетрясений и получения значений моментной магнитуды M_W , а также распространением шкал локальной магнитуды M_L магнитуду все реже определяют по поверхностной волне. Тем не менее из-за простоты и точности определения значений величины M_S этот способ измерения магнитуды остается номером один, например, для центров

предупреждения о цунами на Дальнем Востоке. Для соблюдения непрерывности и преемственности каталогов уточнение зависимости между магнитудами является актуальной задачей.

Шкала моментных магнитуд M_W в настоящее время признана наиболее авторитетной. Причинами этого являются, во-первых, привязка этой магнитудной шкалы к физически обоснованным величинам параметров очага землетрясения через сейсмический момент; во-вторых, отсутствие эффекта насыщения этой магнитуды в максимально большом диапазоне значений; в-третьих, как правило совпадающие до первого знака после запятой оценки этой магнитуды, получаемые разными агентствами с использованием различных методов. Практически любую новую вводимую в обращение магнитудную шкалу чаще всего сравнивают именно со шкалой моментных магнитуд. Это делает величину M_W удобной для использования в качестве прокси-магнитуды для транзитного перехода между различными магнитудными шкалами. Кроме того, моментную магнитуду или расчетный сейсмический момент делают основой унифицированных каталогов.

В каталоге Курило-Охотского региона Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской Академии Наук” (СФ ФИЦ ЕГС РАН) в качестве основной магнитуды для унификации энергетических характеристик землетрясений используется магнитуда MLH (методический аналог M_S). В статье [Сафонов, 2024] предложены переходные соотношения между магнитудой по поверхностной волне MLH каталога Курило-Охотского региона и моментной магнитудой M_W . Помимо этого, в ней представлены новые либо уточненные формулы связи других региональных магнитудных шкал с MLH и M_W , что позволяет привести величину землетрясений в соответствие с данными других каталогов с учетом региональных особенностей ее определения. Однако в указанной работе не решен ряд проблем, возникающих ввиду ограничения предложенных соотношений диапазоном слабых и умеренно-сильных землетрясений. Кроме того, для унификации каталогов региона по данным разных агентств необходимо связать переходными

соотношениями магнитуды этих агентств, что можно сделать как напрямую при наличии необходимого количества общих определений, так и транзитным пересчетом с использованием имеющихся формул.

Цель данной работы — расширить диапазон применимости зависимости между магнитудами MLH и M_W и использовать полученную зависимость для пересчета энергетических характеристик землетрясений между шкалами различных агентств.

Для этого были реализованы следующие задачи:

- 1) скомпилирован достаточно полный каталог пар значений магнитуд MLH и M_W ;
- 2) определен оптимальный вид межмагнитудной зависимости;
- 3) учтены особенности определения M_W различными агентствами;
- 4) получена двухсегментная зависимость $M_W(MLH)$ методом ортогональной стандартной регрессии (OSR);
- 5) показано отличие данного соотношения от его аналогов;
- 6) показано использование полученной зависимости в качестве транзитной для переходных соотношений к магнитудам соседних региональных агентств.

ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И СОВРЕМЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТУДЫ M_S

Исторически одной из первых массово применяемых магнитудных шкал стала предложенная Б. Гутенбергом в 1945 г. [Gutenberg, 1945] шкала на основе записи максимальных смещений $A_{\max}$ в группе поверхностных волн землетрясений на горизонтальных компонентах сейсмографа на периодах $T \approx 20$ с, рекомендованная к применению в диапазоне эпицентральных расстояний $20^\circ \leq \Delta < 130^\circ$. В 1962 г. была введена в употребление Пражская формула [Ванек и др., 1962] для магнитуды $M_S(BB)$, отличие которой состояло в использовании по предложению С.Л. Соловьева [1955] максимальной колебательной скорости $V_{\max} = 2\pi(A/T)_{\max}$, что позволило расширить применимость

магнитудной шкалы для большего диапазона периодов и близких расстояний ($2^\circ \leq \Delta < 160^\circ$). Она также определялась по горизонтальным компонентам сейсмографов и стала основной магнитудой единой сети сейсмологических наблюдений (ЕССН) СССР и стран Восточной Европы.

Как указано в работе [Bormann et al., 2013], рекомендация использовать Пражскую формулу в качестве стандарта для расчета M_S в целом была принята мировым сейсмологическим сообществом. Однако сейсмологические агентства США решили использовать ее только на телесейсмических расстояниях $20^\circ \leq \Delta < 160^\circ$ и для измерения амплитуд в диапазоне $T = 18\text{--}22$ с в соответствии с оригинальной формулой и рекомендациями Гутенберга. Эта практика, основанная на замерах амплитуд колебательной скорости по записям длиннопериодных приборов, стала стандартной во всем западном сейсмологическом сообществе (соответствующая магнитуда имеет обозначение $M_S(20)$, или просто M_S). При этом с началом применения более совершенной аналоговой, а затем и цифровой аппаратуры в измерении амплитуд и периодов произошел переход от горизонтальных компонентов сейсмографов к вертикальному. В настоящий момент стандартом для определения M_S является методика Геологической службы США [NEIC, 2024].

В СССР и странах Восточной Европы в практику определения магнитуды по поверхностной волне были введены две шкалы, получившие обозначение соответственно используемым каналам сейсмографа: MLH — по горизонтальным компонентам, MLV — по вертикальному.

Как показано, например, в работах [Горбунова и др., 1974; Bormann, Wylegalla, 1975], разница в результатах определения магнитуды по вертикальному каналу и горизонтальным оказалась незначительной и не выходит за пределы значений погрешности определения магнитуд. При этом снятие замеров по одному каналу проще, к тому же в записях вертикального канала часто обнаруживается меньше помех на частотах, характерных поверхностным волнам, чем в синхронных ему моментах записей горизонтальных каналов. Поэтому в данной работе будет принято $MLV \approx MLH$.

Согласно инструкции, которой руководствовались сотрудники ЕССН СССР [Инструкция ..., 1982], волна MLV определяется по амплитудам $A_{\max}$ и соответствующим ей периодам T , замеренным на вертикальной составляющей в максимальной фазе волн Рэлея (что вынужденно отличается от измерений $(A/T)_{\max}$). Магнитуда MLH определяется по полному горизонтальному вектору смещения, который рассчитывается по максимальным амплитудам и соответствующим им периодам на горизонтальных составляющих, замеренным в тот же момент времени, что и по вертикальной составляющей (допустима разница в полпериода). Во всех случаях используется одна и та же калибровочная кривая, рассчитанная для эпицентральных расстояний $2^\circ\text{--}180^\circ$ (значения функции затухания, приводимые в виде таблицы, соответствуют “Пражской формуле” [Ванек и др., 1962], однако дистанция применимости увеличена). Для землетрясений Дальнего Востока, записанных на эпицентральных расстояниях до 18° , применяется отдельная таблица значений калибровочной функции [Соловьев, 1974], полученная на основе изучения землетрясений Курильских островов и Камчатки, записанных станциями Дальнего Востока СССР. Необходимость такой коррекции обосновывается существенным (до трех раз) уменьшением амплитуды поверхностных волн от этих землетрясений, записываемых региональными станциями.

Снятие замеров амплитуд для определения $M_S(BB)$ ЕССН (MLV и MLH) производилось по записям средне- и длиннопериодной аппаратуры СК и СКД [Аппаратура ..., 1974]. Вследствие перехода на цифровую регистрацию для определения MLV и MLH стала использоваться цифровая эмуляция этих приборов, что позволило каталогам сохранить преемственность определяемой магнитудной шкалы.

В современной практике магнитудных оценок ФИЦ ЕГС РАН [Маловичко и др., 2023; Габсатарова, Пойгина, 2024] энергетические параметры землетрясений сводного каталога приводятся к единой магнитуде M с опорой на магнитуду по поверхностной волне на вертикальной компоненте сейсмографа — $M_S^{\text{MOS}}(MLV)$, определяемой согласно инструкции ЕССН [Инструкция ..., 1982], в некоторых

случаях также привлекается M_S^{ISC} (из бюллетеней ISC). Для неглубоких землетрясений условно принимается $M = M_S^{MOS} = M_S^{ISC} = MLH$.

Шкала $M_S(20R)$, являющаяся модификацией $M_S(20)$, используется на Дальнем Востоке России для близких расстояний 80–3000 км [Чубарова и др., 2010; Чубарова, Гусев, 2017]. Она совмещает достоинства $M_S(20)$ и $M_S(BB)$ и применяется для измерения сильных региональных землетрясений.

В международном сейсмологическом центре (ISC) [Bondar, Storchak, 2011; Di Giacomo et al., 2015] расчет M_S^{ISC} осуществляется по большому числу станционных измерений амплитуд и периодов поверхностной волны, предоставляемых различными сейсмологическими агентствами, на основе Пражской формулы в диапазоне периодов волн $T = 10–60$ с на эпицентральных расстояниях $20–160^\circ$. При этом принимаются в расчет данные как вертикального, так и горизонтальных каналов сейсмографа. Как было показано, например, в работе [Scordilis, 2006], разница между M_S^{NEIC} и широкополосной M_S^{ISC} незначительна.

Основные недостатки магнитуды по поверхностной волне следующие: насыщение на значениях выше $M_S \approx 8.2$; необходимость для определения длиннопериодной аппаратуры, записывающей периоды колебаний до $T \approx 20$ с, – такой аппаратурой комплектуются далеко не все пункты регистрации; магнитуда доступна только для умеренно-сильных и сильных событий, не определяется на близких дистанциях (менее 2° для $M_S(BB)$ и менее 20° для $M_S(20)$); возможность корректного определения магнитуды глубоких ($h > 80$ км) землетрясений достаточно дискуссионная [Petrova, Gabsatarova, 2020].

В последние десятилетия в связи с распространением M_W магнитуда по поверхностной волне перестает быть основой каталогов, хотя и не выходит полностью из употребления. Так, на сайте геологической службы США USGS [NEIC, 2024] о магнитуде $M_S(20)$ говорится следующее: “Она учитывается NEIC, но редко используется как авторитетная, поскольку при этих магнитудах [$\sim 5.0–8.5$] почти всегда доступна M_W . M_S значима в первую очередь при сильных (> 6) неглубоких землетрясениях, обеспечивая повторное подтверждение их величины”.

В региональных каталогах ФИЦ ЕГС РАН также довольно часто основной магнитудой сейчас принимается $M \approx M_W$, $M \approx M_L$ (локальная магнитуда по объемным волнам). Магнитуда M_S определяется на постоянной основе только для наиболее сильных событий. В Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН [Фокина и др., 2023] все энергетические характеристики землетрясений приводятся с помощью межмагнитудных соотношений в порядке приоритета использования к магнитуде $M = MLH$, хотя непосредственно MLH определяется довольно редко и по малому числу преимущественно региональных сейсмостанций. После включения в каталоги СФ ФИЦ ЕГС РАН региональной моментной магнитуды M_{Wper} [Сафонов, Коновалов, 2017] приоритет M_W стал выше, чем MLH , однако условно принимается $M_{Wper} \approx MLH$.

ВЫБОР ВИДА РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ $M_W(MLH)$

Изначально из логики перехода от величины сейсмического момента к магнитуде с использованием формулы для энергии Гутенберга–Рихтера следовало, что $M_S = M_W$ [Kanamori, 1977; Hanks, Kanamori, 1979], однако это применимо только для сильных землетрясений с $M_S > 6.8$ [Ekström, Dziewonski, 1988; Bormann et al., 2013].

Изучению этой взаимосвязи на больших объемах данных различных каталогов посвящено множество работ. В работе [Ekström, Dziewonski, 1988] предложена трехсегментная зависимость между M_0 по данным GCMT [GCMT, 2024] и M_S в диапазоне значений $M_S = 4.5–7.5$. При этом средний сегмент зависимости представлен степенной функцией для плавного перехода. Его исключение и использование двух крайних линейных формул на диапазоне до их пересечения вблизи значения $M_S = 6.2$ приводит к потере в точности расчета всего в 0.1 магнитудной единицы (м.е.).

В работе [Scordilis, 2006] представлена двухсегментная зависимость между M_S и M_W (здесь и далее Se – стандартная ошибка регрессии, N – размер выборки):

$$3.0 \leq M_S \leq 6.1 : M_W = 0.67(\pm 0.005)M_S + 2.07(\pm 0.03), \\ Se = 0.17, N = 23921; \quad (1)$$

$$6.2 \leq M_S \leq 8.2 : M_W = 0.99(\pm 0.02)M_S + 0.08(\pm 0.13), \\ Se = 0.20, N = 2382. \quad (2)$$

Предварительно исследовано соответствие определений M_W по данным NEIC [NEIC, 2024] и GCMT [GCMT, 2024], а также M_S^{ISC} и M_S^{NEIC} , показавшее их незначительные различия. Также сравнивались зависимости $M_W(M_S^{ISC})$ и $M_W(M_S(BB))$ по данным европейского каталога [Karnik, 1996], продемонстрирована значительная разница в пересчете, увеличивающаяся с уменьшением магнитуды землетрясений.

В работе [Di Giacomo et al., 2015] по данным каталога ISC-GEM получена двухсегментная линейная зависимость M_S^{ISC} от M_W , довольно похожая на приведенную в работе [Scordilis, 2006], а также экспоненциальная зависимость

$$M_W = e^{(-0.222 + 0.233M_S)} + 2.263. \quad (3)$$

Зависимость между M_S и M_W исследуется в работе [Das et al., 2011] на основе данных различных глобальных каталогов, в работе [Lolli et al., 2014] — на основе онлайн бюллетеня ISC; в статье [Cheng et al., 2017] — на основе каталога землетрясений Китая.

Для Дальневосточного региона РФ наиболее актуальной остается работа [Гусев, Мельникова, 1990], где рассчитана связь магнитуд дальневосточных землетрясений с M_W по данным различных агентств, сопоставленных друг с другом. В этой работе найдены нелинейные зависимости между сейсмическим моментом и отдельно M_S Гутенберга, $M_S(20)$ и $M_S(BB)$, представленные в табличном и графическом виде.

Также актуальна для всей территории России работа [Petrova, Gabsatarova, 2020], посвященная уточнению магнитудных поправок к M_S^{MOS} в зависимости от глубины очага землетрясений Северной Евразии. В этой работе для землетрясений с $h \leq 40$ км предложена трехсегментная линейная зависимость между M_S^{MOS} , определяемой в ФИЦ ЕГС РАН и публикуемой в Сейсмологическом каталоге [Сейсмологический каталог, 2024], и M_W по данным ISC-GEM [Di Giacomo et al., 2018]:

$$M_W < 5.9 : M_S^{MOS} = 1.577 M_W - 3.47; \quad (4)$$

$$5.9 \leq M_W \leq 7.0 : M_S^{MOS} = 1.182 M_W - 1.15; \quad (5)$$

$$M_W > 7.0 : M_S^{MOS} = 0.84 M_W + 1.3. \quad (6)$$

Также в этой работе показано небольшое, но значимое отличие M_S^{MOS} от M_S^{ISC} , для которых представлена линейная зависимость.

Общим для зависимостей $M_S(M_W)$ (или $(M_W(M_S))$) является изгиб получаемой кривой в области значений $M_S \approx 6.2$, когда видимая пропорциональность $M_W \approx M_S$ на определенном участке нарушается. На рис. 1а показан частотный диапазон применения магнитудной шкалы $M_S(BB)$ [Bormann et al., 2013]. Как видно из рисунка, в этот диапазон попадает характерная угловая частота землетрясений f_c с моментной магнитудой $6.0-6.5 < M_W < 8.0-8.5$. В этом диапазоне можно ожидать адекватную оценку сейсмической энергии по группе поверхностных волн и примерное равенство $M_W \approx M_S(BB)$. За пределами этого интервала, как показано в работах [Kanamori, 1983; Bormann et al., 2013], можно ожидать нарастающую недооценку величины землетрясения по шкале $M_S(BB)$ в сопоставлении с M_W (см. рис. 1б). Таким образом, зависимость $M_S(BB)$ от (M_W) можно условно разбить на три интервала: $M_S(BB) > 8.0-8.5$, $M_S(BB) \approx 6.5-8.0$ и $M_S(BB) < 6.0-6.5$. Понятно, что частота поверхностных волн каждого отдельного землетрясения может отличаться при измерениях на разных сейсмостанциях в зависимости от эпицентрального расстояния и типа земной коры на пути распространения волны, а граница между этими интервалами будет размытой. Поэтому можно ожидать, особенно с учетом разброса оценки магнитуды, плавный переход между разными сегментами с возможностью описать всю зависимость кривой, как это сделано, например, в работах [Гусев, Мельникова, 1990; Di Giacomo et al., 2015]. Однако и в том, чтобы использовать сегментированную линейную зависимость, тоже есть определенный смысл, особенно для $M_S(BB)$ с учетом достаточно широкого диапазона частот, в котором она измеряется. При этом точку перехода одного соотношения в другое можно выбирать в некотором диапазоне в зависимости от удобства.

Сложность в получении зависимости представляет первый интервал $M_S(BB) > 8.0-8.5$

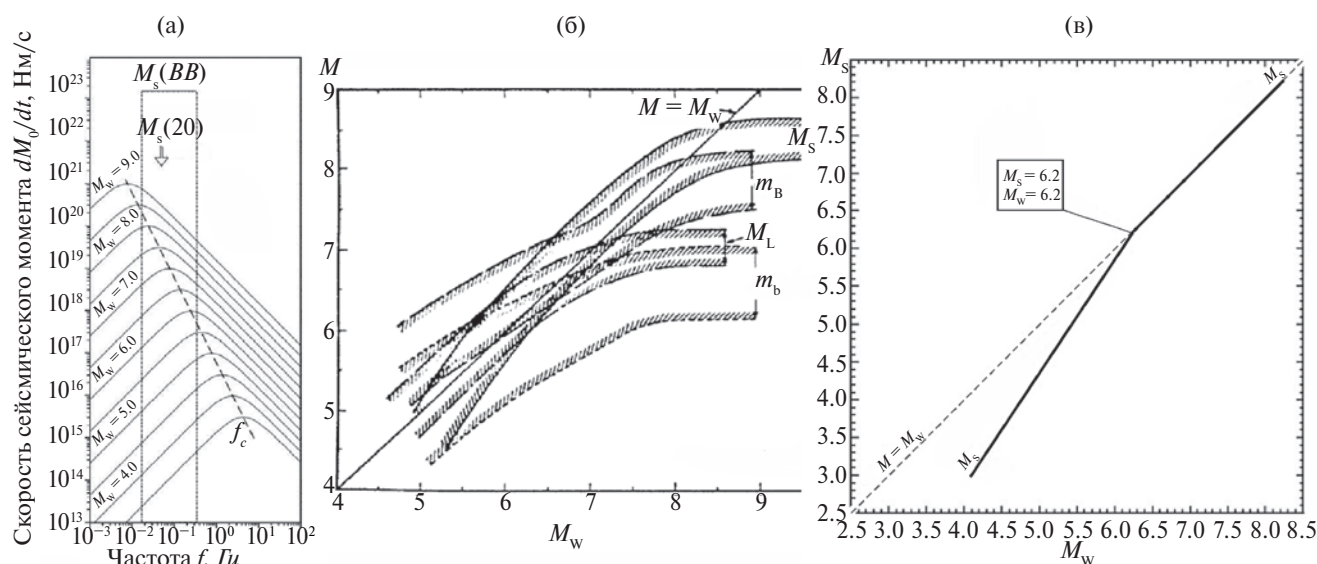


Рис. 1. Скорость смещения грунта как функция частоты для “средних” сейсмических источников, масштабированных по M_0 и M_W ; стрелкой показана частота определения магнитуды $M_s(20)$, рамкой — диапазон частот, в пределах которого измеряются максимальные амплитуды волн Рэлея для $M_s(BB)$ [Bormann et al., 2013] (a); приблизительные соотношения и диапазоны изменчивости M_L , m_b , m_B и M_s относительно M_W , согласно [Kanamori, 1983] (б); принципиальный вид зависимости между M_W и M_s из работы [Scordilis, 2006] (в).

для наиболее сильных землетрясений, которые редки, зато определяются большим количеством телесейсмических сейсмостанций, поэтому такая зависимость возможна только для глобального каталога за длительный период измерений. В каталоге Курило-Охотского региона в период прямых измерений магнитуды землетрясений с $MLH > 8.5$ нет, события $MLH > 8.0$ за последнюю половину века отмечены лишь трижды, поэтому первый сегмент зависимости не актуален.

Второй интервал нам более интересен, так как примерное равенство $M_W \approx M_s(BB)$ все же не соблюдается с высокой точностью, вместе с тем сильные региональные события также хорошо регистрируются мировой сетью, а потому расхождения в результатах определения M_s являются скорее следствием методических особенностей агентств, чем регионального затухания сейсмических волн. Полученную зависимость можно сопоставить с зависимостями других агентств и регионов, при этом можно ожидать их примерного совпадения. Вместе с тем сильные землетрясения в небольшом регионе происходят не часто, поэтому для сопоставления необходим длительный интервал наблюдений и обработки по единой методике. Это условие достаточно хорошо соблюдается для каталога Курило-Охотского региона.

Для третьего интервала ($M_s(BB) < 6.0–6.5$) возникает другая сложность — нижняя граница магнитудных определений. Для каталога GCMT [GCMT, 2024], наиболее авторитетного для получения межмагнитудных зависимостей с использованием M_W , в пределах региона граница составляет $M_W \approx 4.9$ и является излишне резкой. Потому необходимо привлечь дополнительные данные для увеличения диапазона сравниваемых значений магнитуд — для этого был использован каталог землетрясений агентства NIED, Япония [NIED, 2024].

Таким образом, наиболее проста в получении и дальнейшем применении двухсегментная зависимость $M_W(MLH)$ в диапазоне значений $MLH \leq 8.1$, подобная той, что получена для M_s в работе [Scordilis, 2006] (см. рис 1в). Она позволяет охватить весь диапазон доступных значений MLH каталога Курило-Охотского региона.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Курило-Охотский регион (рис. 2), входящий в зону ответственности за регистрацию землетрясений Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН, включает в себя южную часть акватории Охотского моря, Курильские острова, о. Хоккайдо и северную часть Японского моря. В период существования каталога его границы

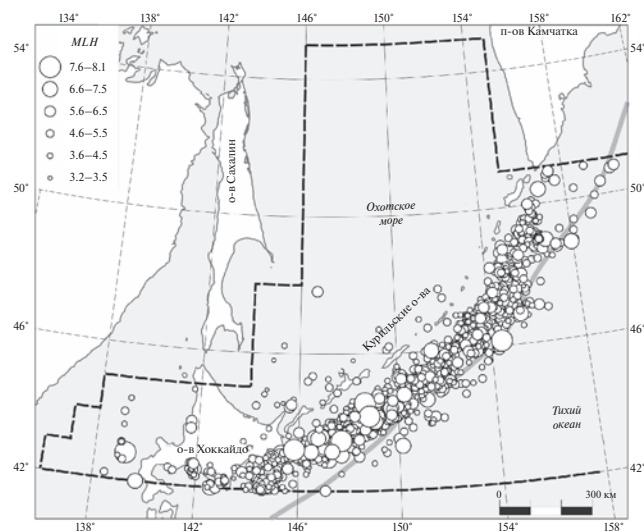


Рис. 2. Эпицентры землетрясений Курило-Охотского региона 1968–2022 гг. с глубиной очага $h \leq 80$ км. Штриховой линией показаны максимальные границы Курило-Охотского региона.

несколько менялись (на рис. 2 показаны границы региона, включающие все входившие в него территории). Каталог землетрясений региона составлялся до 2022 г. отделом сводной обработки сейсмологических данных филиала на основе как записей региональных и телесеизмических сейсмостанций, принадлежащих организации, так и данных, получаемых из различных доступных источников. Каталог Курило-Охотского региона ежегодно публикуется журналом “Землетрясения Северной Евразии” и ежегодником “Землетрясения России” Издательства Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” [Фокина и др., 2023; Фокина и др., 2024 и др.], где Сахалинский филиал фигурирует под кодом агентства “SAGSR”. Каталог за более ранние годы публиковался в сборниках “Землетрясения в СССР”. Данные также доступны в бюллетенях ISC [ISC, 2024], где можно встретить старые коды агентства “SKL” и “SKHL”.

Каталог Курило-Охотского региона СФ ФИЦ ЕГС РАН содержит восемь различных региональных энергетических характеристик землетрясений: помимо MLH это магнитуды по объемным волнам (методические производные m_B) MPV , $MPVA$, MPH , MSH , $MSHA$ [Инструкция ..., 1982], энергетический класс землетрясений С.Л. Соловьева K_C [Соловьев, Соловьева, 1967] и региональная моментная магнитуда $M_{w\text{рег}}$ [Сафонов, Коновалов, 2017]. В зависимости

от величины и глубины очага землетрясения доступны различные магнитуды из этого перечня. Переход к унифицированной расчетной магнитуде $M = MLH \approx M_{w\text{рег}}$ осуществляется по формулам, полученным более полувека назад [Фокина и др., 2023]. Методика определения MLH описана выше и соблюдается в течение всего времени существования каталога.

В статье [Сафонов, 2024] автором было предложено новое линейное переходное соотношение между магнитудой по поверхностной волне MLH каталога Курило-Охотского региона и моментной магнитудой M_w :

$$4.0 \leq M_w \leq 7.0 : MLH = 1.24(\pm 0.03) M_w - 1.48(\pm 0.17),$$

$$Se = 0.173, N = 1158, \quad (7)$$

а также между этими двумя магнитудами и другими энергетическими характеристиками каталога. Предложенные переходные формулы рекомендованы к использованию в интервалах магнитуд $M_w \sim 3.5-7.0$. Этих соотношений достаточно для оценки величины умеренно-сильных землетрясений, однако для более сильных их применение дает нереалистичный результат. Также при исследовании не проводилось различий между значениями M_w , полученными из разных источников, так как они полагались незначительными. Тем не менее получаемые оценки моментной магнитуды все-таки имеют некоторую зависимость от определяющего агентства.

Для Курило-Охотского региона доступны, помимо прочих, результаты определения моментной магнитуды агентства (GCMT, США), региональных агентств (NIED, Япония) и Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН (SAGSR).

Каталог агентства NIED доступен с 1997 г. для южной части Курило-Охотского региона (до 49° с.ш.), однако он включает только события магнитудой $M_w \geq 3.5$, поэтому, несмотря на большое количество магнитудных определений в целом, он содержит ограниченное число значений для сильных событий, что делает каталог слабо представительным в этом диапазоне. Каталог GCMT охватывает более длительный период времени и землетрясения всего региона, однако ограничен снизу по магнитуде $M_w \approx 4.9$, причем резкая граница нарушает нормальное распределение магнитудной ошибки.

Совместное использование каталогов сглаживает их недостатки.

Предварительно было исследовано соответствие значений магнитуд M_W для землетрясений, присутствующих одновременно в каталогах NIED и GCMT, в пределах Курило-Охотского региона (рис. 3), для сравнения также использовалась $M_{W\text{per}}$ SAGSR:

$$M_W^{\text{NIED}} = 1.04(\pm 0.03) M_W^{\text{GCMT}} - 0.29(\pm 0.17), \\ Se = 0.081, N = 658; \quad (8)$$

$$M_{W\text{per}} = 1.01(\pm 0.03) M_W^{\text{GCMT}} - 0.13(\pm 0.16), \\ Se = 0.061, N = 221; \quad (9)$$

$$M_{W\text{per}} = 0.99(\pm 0.02) M_W^{\text{NIED}} + 0.02(\pm 0.09), \\ Se = 0.076, N = 327. \quad (10)$$

Получено небольшое устойчивое занижение M_W^{NIED} и $M_{W\text{per}}$ относительно M_W^{GCMT} (в среднем приблизительно 0.05–0.07 магнитудных единиц в доступном для определения диапазоне), разница между M_W^{NIED} и $M_{W\text{per}}$ составила ~0.02 м.е. С учетом обычной практики округления магнитудных значений до первого знака после запятой и средней стандартной ошибки моментной магнитуды в 0.09–0.18 м.е. [Wason et al., 2018] в большей части случаев для оценки величины отдельных землетрясений такое различие несущественно, однако систематическое смещение может оказать влияние на переходные соотношения.

Отличный от единицы коэффициент наклона прямой $M_W^{\text{NIED}}(M_W^{\text{GCMT}})$ также прослеживается в работе [Kubo et al., 2002] при сравнении определений сейсмических моментов для всего региона Японии: происходит возрастающая с уменьшением магнитуды недооценка величины сейсмического момента по данным NIED (см. рис. 3) либо переоценка по данным GCMT.

Так как каталог GCMT содержит мало событий Курило-Охотского региона магнитудой $M_W < 4.9$, нет возможности оценить соотношение $M_W^{\text{NIED}}(M_W^{\text{GCMT}})$ для более слабых землетрясений. Согласно полученной линейной зависимости (8), для $M_W = 4.9$ средняя разница в оценке моментной магнитуды между GCMT и NIED составляет существенные $\mu = 0.09$ м.е.

Если предположить, что сейсмический момент слабых региональных землетрясений лучше оценивается региональным агентством NIED, можно пренебречь найденным несоответствием и совместить каталоги без его учета. В этом случае можно получить зависимость между MLH и условной моментной магнитудой без привязки к агентству определения. Такой вариант (см. зависимость (7)) принят автором в работе [Сафонов, 2024].

Другая возможность – предположить, что с уменьшением магнитуды событий линейная зависимость (8) сохраняется, и скорректировать M_W . В этом случае слабым землетрясениям магнитудой $M_W^{\text{NIED}} = 3.5$ будет соответствовать $M_W^{\text{GCMT}} = 3.64$, что повлияет на наклон

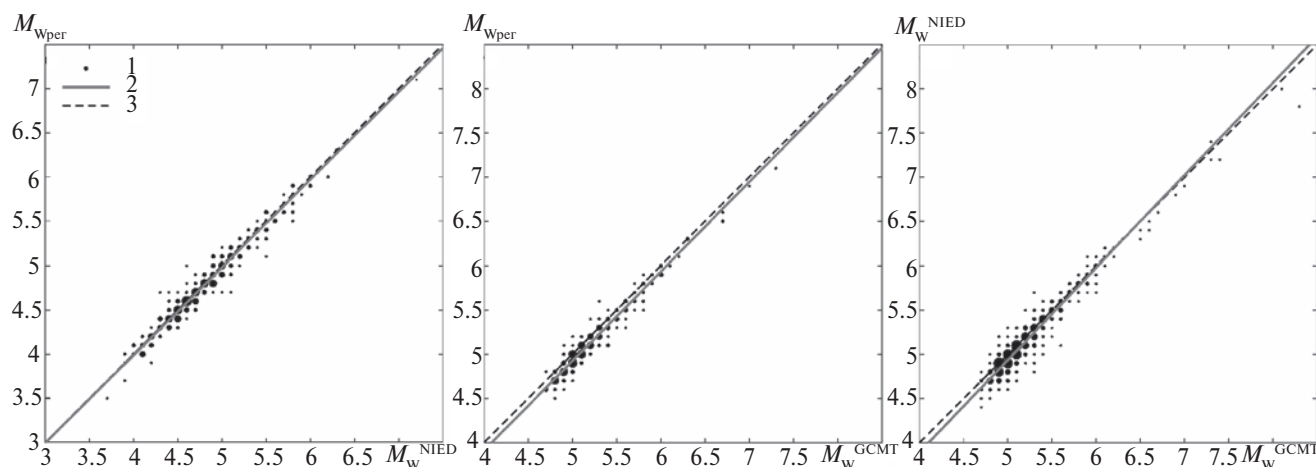


Рис. 3. Зависимость между моментными магнитудами M_W по данным агентств SAGSR, NIED и GCMT. 1 – положение пар значений магнитуды (размер пропорционален количеству данных в точке); 2 – регрессионная прямая, полученная методом OSR; 3 – линия равных значений магнитуд (1:1).

регрессионной прямой, насколько существенно — будет показано ниже. Такой подход применен в данной работе.

Для выполнения исследования собран каталог землетрясений Курило-Охотского региона за 1968–2022 гг. Основную часть ($N = 1676$) результатов измерений магнитуды MLH составили данные Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН за 1981–2019 гг., опубликованные в сборниках “Землетрясения в СССР” и журнале “Землетрясения Северной Евразии”. Для увеличения количества сильных землетрясений в выборку добавлены 77 событий из бюллетеня ISC [ISC, 2024] за 1968–1980 гг., где в качестве MLH учитывалась магнитуда M_S по данным агентства SKL, а в случае отсутствия — близкая ей по методике определения и используемой сети сейсмостанций M_S^{MOS} , в предположении, что $M_S^{MOS} \approx MLV \approx MLH$. Также использованы данные из фондов СФ ФИЦ ЕГС РАН 2020–2022 гг., готовящиеся к публикации ($N = 34$).

Моментная магнитуда для выборки заимствовалась из каталога GCMT [GCMT, 2024; ISC, 2024] (1101 событие), дополненного скорректированными по зависимости (8) данными агентства NIED [NIED, 2024] за 1997–2022 гг. (686 событий). Для сравнения принимались землетрясения с глубиной очага в пределах $h = 0–80$ км. Региональные определения M_{Wper} не учитывались, так как почти все обработанные события присутствуют в двух используемых каталогах. Это позволило подготовить более представительный каталог, чем в работе [Сафонов, 2024], особенно в диапазоне сильных землетрясений $MLH > 7.0$, число которых увеличилось почти вдвое. Всего в выборке 1787 событий в интервалах магнитуд $MLH = 3.0–8.1$, $M_W = 3.7–8.3$ (см. рис. 1).

Расчет межмагнитудных соотношений производился методом ортогональной стандартной регрессии (OSR), поскольку стандартная ошибка определения магнитуды MLH по данным каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН, как показано в работе [Сафонов, 2024], близка к ее величине для M_W , а их отношение укладывается в диапазон $0.7 < \eta < 1.8$, рекомендованный авторами статьи [Bormann et al., 2013]. Как и в работе [Сафонов, 2024], непосредственно в расчетах использован алгоритм “deming” для Matlab [Hall, 2024], адаптированный для целей данной работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4а показаны собранные для получения зависимости $MLH(M_W)$ 1787 пар магнитудных значений землетрясений с эпицентрами в пределах Курило-Охотского региона. При этом явная нелинейность полученного облака значений очевидна даже “на глаз” и подтверждается положением средних точек, построенных для фрагментов каталога, отобранных ортогонально линии равных значений магнитуд (1:1) с интервалом в 0.2 величины $(MLH + M_W)/2$. Чтобы избежать эффекта обрезки каталога, выборка была разделена ортогонально средней линии на участке, где $MLH \approx M_W$. Для увеличения количества событий “верхнего” фрагмента сделано перекрытие диапазона выборок на 0.5 м.е. Таким образом, “нижний” фрагмент — $(MLH + M_W)/2 \leq 6.5$, 1703 пары значений; “верхний” — $(MLH + M_W)/2 \geq 6.0$, 145 пар. Далее методом ортогональной стандартной регрессии получено соотношение $MLH(M_W)$ для “нижней” и “верхней” частей каталога. Пересечение двух полученных прямых произошло в месте перекрытия фрагментов вблизи магнитуд $M_W = 6.1–6.2$ и $MLH = 6.2–6.3$ — эти значения можно принять в качестве точки перегиба линейной зависимости. С учетом области фактического наличия данных полученная зависимость $MLH(M_W)$ и диапазон ее применения имеют вид

$$4.0 \leq M_W \leq 6.1, 3.2 \leq MLH \leq 6.2 :$$

$$MLH = 1.42(\pm 0.03) M_W - 2.43(\pm 0.15),$$

$$N = 1734, Se = 0.164; \quad (11)$$

$$6.2 \leq M_W \leq 8.1, 6.3 \leq MLH \leq 8.1 :$$

$$MLH = 0.96(\pm 0.08) M_W + 0.37(\pm 0.50),$$

$$N = 145, Se = 0.161. \quad (12)$$

На рис. 4б приведены соотношения $M_S(M_W)$ для некоторых упоминавшихся выше работ. Это криволинейные зависимости для $M_S(BB)$ из работы [Гусев, Мельникова, 1990] и M_S^{ISC} [Di Giacomo et al., 2015], а также сегментированные зависимости для M_S из работы [Scordilis, 2006] и M_S^{MOS} из статьи [Petrova, Gabsatarova, 2020]. Можно отметить, что в верхнем магнитудном диапазоне $M_W \sim 7.0–8.2$ все зависимости очень близки и укладываются в интервал значений $\Delta M = 0.1$ м.е., что сравнимо с точностью определения магнитуд. Расчетные значения широкополосных M_S^{MOS} и MLH превышают значения M_S , что отмечалось еще в ранних работах:

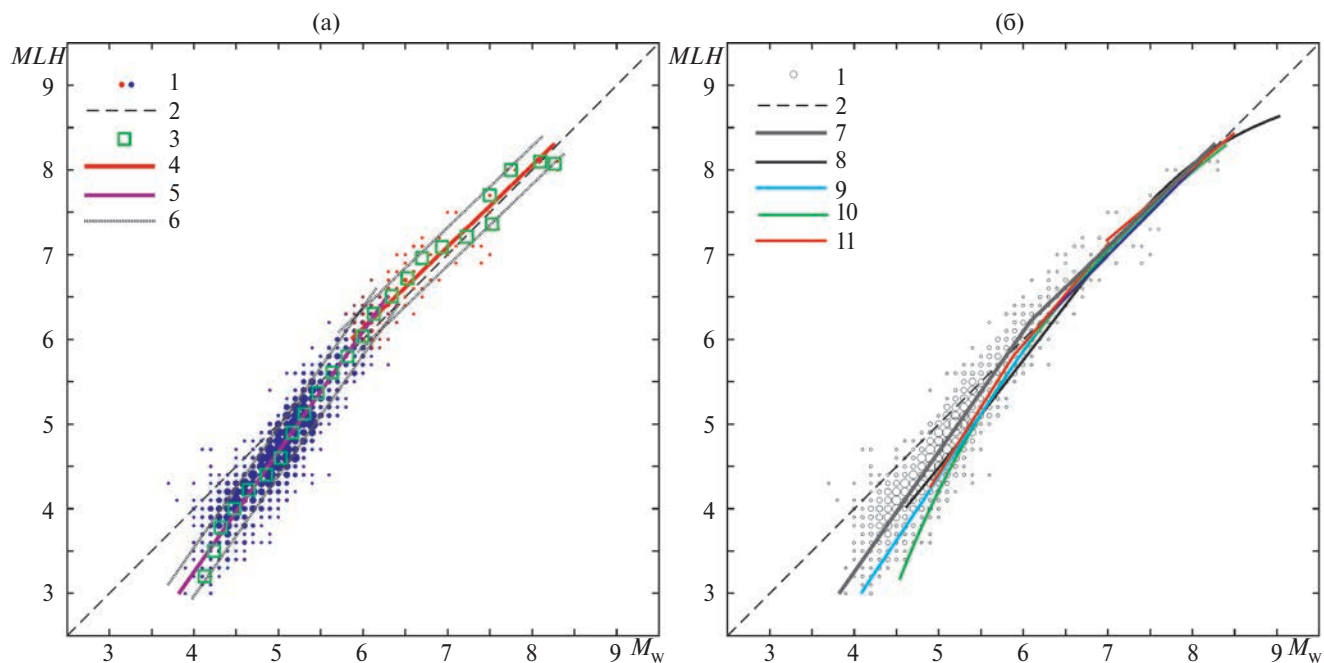


Рис. 4. Зависимость магнитуды MLH каталога Курило-Охотского региона СФ ФИЦ ЕГС РАН от M_W по данным агентств GCMT и NIED.

а – получение двухсегментной зависимости (1 – положение пар значений магнитуды; 2 – линия равных значений магнитуд (1:1); 3 – средние значения магнитуд на интервалах в 0.2 м.е., отложенных ортогонально линии (1:1); 4, 5 – регрессионные прямые, полученные методом OSR, для “верхнего” и нижнего фрагментов соответственно; 6 – интервал стандартной ошибки регрессии Se); б – сравнение полученной зависимости с вариантами $M_S(M_W)$ из других работ (7 – полученная зависимость $MLH(M_W)$; 8 – [Гусев, Мельникова, 1990]; 9 – [Scordilis, 2006]; 10 – [Di Giacomo et al., 2015]; 11 – [Petrova, Gabsatarova, 2020]).

например, в работе [Халтурин, 1974] получено соотношение $M_S = MLH - 0.15$.

Расхождение расчетных значений ниже этого диапазона для $M_W = 6.0-7.0$ в разных работах главным образом возникает из-за того, что авторы по-разному преодолевают изгиб зависимости. Можно сгладить этот участок дополнительным сегментом, как в работах [Ekström, Dziewonski, 1988; Petrova, Gabsatarova, 2020], однако при дополнительном делении каталога диапазон магнитуд для расчета сократится, что ухудшит результат регрессии. Скорее всего по этой причине сегментированная зависимость из статьи [Petrova, Gabsatarova, 2020] терпит небольшой разрыв при совмещении верхних, наименее представительных сегментов. Кроме того, если судить по положению средних значений интервалов в 0.2 м.е., плавного перегиба между линейными участками не отмечается, потому был выбран показанный на рис. 4 вариант двухсегментной зависимости.

Ниже значения $M_W = 6.2$ предлагаемая региональная зависимость дает большие оценки магнитуды, чем остальные приведенные соотношения. Наклон “нижнего” сегмента меньше, чем всех остальных, кроме нижней части кривой [Гусев, Мельникова,

1990]. Разница в значениях MLH при пересчете на уровне самых слабых событий ($M_W = 4.0$) следующая: со значением $M_S^{\text{MOS}} - \Delta M = 0.41$ м.е. [Petrova, Gabsatarova, 2020], с $M_S - \Delta M = 0.37$ м.е. [Scordilis, 2006], что довольно много. Следовательно, использование предлагаемой зависимости для Курило-Охотского региона действительно имеет смысл и позволит точнее приводить энергетические характеристики региональных землетрясений по данным SAGSR в соответствии с данными других агентств.

Интересно также сравнить зависимости $MLH(M_W)$ на интервале магнитуд относительно слабых событий, полученные с помощью разных подходов составления каталога, которые описывались выше. На рис. 5 показаны пары значений MLH и $M_{W\text{per}}$ Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН из регионального каталога за 2012–2022 гг. Помимо регрессионной прямой по этим данным:

$$MLH = 1.37(\pm 0.12) M_{W\text{per}} - 2.12(\pm 0.64),$$

$$N = 134, Se = 0.150, \quad (13)$$

показана зависимость $MLH(M_W^{\text{NIED}})$, рассчитанная с использованием только M_W из каталога NIED [NIED, 2024] для того же региона за 1997–2022 гг.:

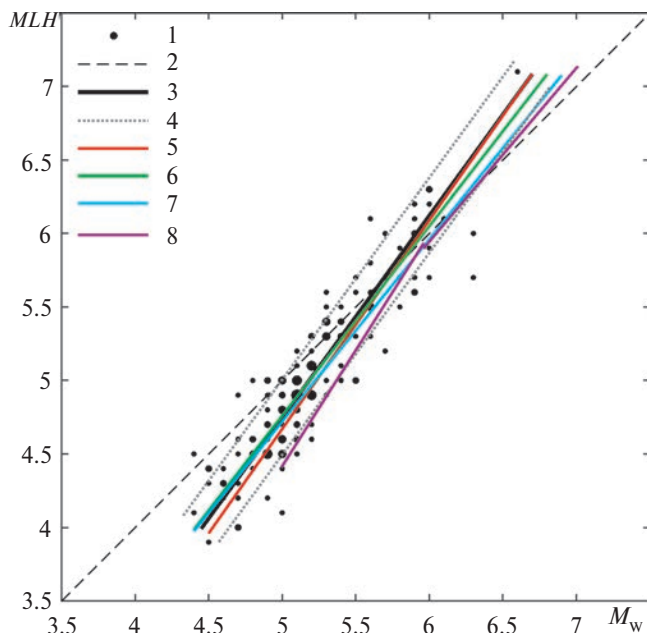


Рис. 5. Зависимость магнитуды MLH от $M_{w\text{пер}}$ каталога Курило-Охотского региона СФ ФИЦ ЕГС РАН 2012–2022 гг. 1 – положение пар значений магнитуды; 2 – линия равных значений магнитуд (1:1); 3 – регрессионная прямая $MLH(M_{w\text{пер}})$, полученная методом OSR; 4 – интервал стандартной ошибки регрессии Se ; 5, 6 – соответственно зависимости (11) и (13) из данной работы; 7 – $MLH(M_w)$ из работы [Сафонов, 2024]; 8 – $M_s^{\text{MOS}}(M_w)$ из статьи [Petrova, Gabsatarova, 2020].

$$MLH = 1.29(\pm 0.04) M_w^{\text{NIED}} - 1.69(\pm 0.19),$$

$$N = 1137, Se = 0.181, \quad (14)$$

а также “нижняя” зависимость (11) и зависимость (7) по совместным данным GCMT [GCMT, 2024] и NIED [NIED, 2024] без коррекции последних из работы [Сафонов, 2024].

Как видно из рис. 5, все прямые лежат довольно близко: для верхнего диапазона применимости ($M_w = 6.1$) разница в расчетах составляет до $\Delta M = 0.15$ м.е., для $M_w = 4.0$ – до $\Delta M = 0.16$ м.е. Приведенная здесь для сравнения часть зависимости [Petrova, Gabsatarova, 2020], наиболее близкая методически, но полученная по данным каталога землетрясений Северной Евразии, все же показывает существенно большее отличие. Использование разных подходов при составлении регионального каталога меньше влияет на результат, чем привлечение данных из других регионов. Помимо этого, в некоторых регионах России отмечена существенная разница в определении M_s^{MOS} и региональной MLH . Вероятно, и для Курило-Охотского

региона следует уточнить соотношение между этими магнитудами.

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ $MLH(M_w)$ ДЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ СООТНОШЕНИЙ К МАГНИТУДАМ СОСЕДНИХ РЕГИОНАЛЬНЫХ АГЕНТСТВ

Курильская островная дуга входит в состав Курило-Камчатской субдукционной системы – важного и интересного для изучения геотектонического объекта. За регистрацию землетрясений здесь в Единой геофизической службе РАН ответственны два филиала: Камчатский [Chebrov et al., 2013; Chebrova et al., 2020] и Сахалинский. В двух соседних филиалах накопились существенные методические различия в оценках энергетических характеристик землетрясений. В Камчатском филиале (агентство KAGSR) основными энергетическими характеристиками землетрясений являются класс С.А. Федотова по максимуму смещения в группе S-волн [Федотов, 1972] K_S и локальная магнитуда M_L , пересчитываемая из K_S [Chebrov et al., 2013]. Для сильных и умеренно-сильных землетрясений с использованием нескольких подходов определяется региональная моментная магнитуда M_w .

Как упоминалось выше, в SAGSR также определяется энергетический класс землетрясений, разработанный С.Л. Соловьевым и О.Н. Соловьевой [Соловьев, Соловьева, 1967] для Курило-Охотского региона. Энергетический класс определяется для наиболее слабых землетрясений, а потому является наиболее массовой энергетической характеристикой землетрясений и может служить основой для составления каталогов либо основной пересчитываемой величиной, как и в KAGSR.

Несмотря на то, что K_S и K_C разрабатывались параллельно для смежных регионов, в методиках их получения есть существенное различие. Так его оценил С.А. Федотов [Федотов, 1972]:

$$K_C = K_S - 0.6. \quad (15)$$

Спустя более полувека можно проверить соблюдение этой зависимости.

Каталоги Сахалинского и Камчатского филиалов ФИЦ ЕГС РАН пересекаются в довольно небольшой области на границе зон

ответственности филиалов в районе Средних и Северных Курильских островов. Во избежание эффекта обрезки данные SAGSR до 2007 г. не использовались, поскольку в более ранних каталогах вводилось ограничение для публикации $K_C < 9$. В каталоге Камчатского филиала действует ограничение по энергетическому уровню $K_S < 8.5$, однако в районе, по которому составлена выборка, это ограничение не достигается. Всего в выборку с 2007 по 2022 г. попало 175 землетрясений энергетического уровня $K_C = 7.9–14.0$ и $K_S = 8.6–14.6$ [Chebrova et al., 2020] (см. рис. 6). Методом ортогональной стандартной регрессии получено соотношение $K_C(K_S)$:

$$9 \leq K_S \leq 14, 8 \leq K_C \leq 13 : K_C = 1.00(\pm 0.05), \\ K_S - 0.72(\pm 0.58), Se = 0.301, N = 175. \quad (16)$$

Как видно из полученного соотношения, разница между классами для всего диапазона значений возросла за прошедшую половину века с 0.6 ед. до 0.7 ед. Равенство коэффициента наклона прямой строго единице – случайность, тем не менее совпадение этого коэффициента с полученным ранее [Федотов, 1972] показывает

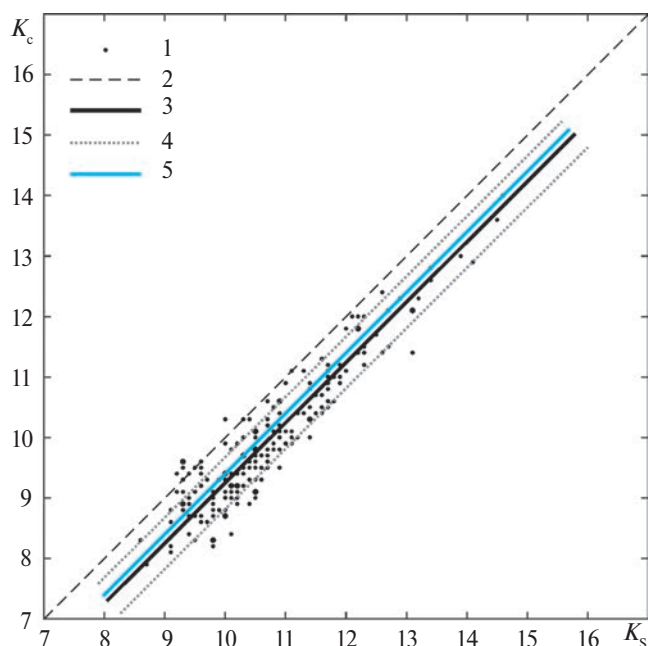


Рис. 6. Зависимость между энергетическими классами Федотова K_S и Соловьева K_C в регионе Средних и Северных Курильских островов за 2007–2022 гг.

1 – положение пар значений энергетического класса; 2 – линия равных значений (1:1); 3 – регрессионная прямая $K_C(K_S)$, полученная методом OSR; 4 – интервал стандартной ошибки регрессии Se ; 5 – соотношение $K_C(K_S)$ из работы [Федотов, 1972].

хорошую устойчивость применяемых шкал. Причина небольшого увеличения расхождения может состоять в переходе с аналоговой на цифровую регистрацию землетрясений и в изменившемся в связи с этим способе снятия замеров.

Для единообразия применяемых формул не лишним будет получить зависимость MLH от K_S или, с соблюдением “размерности” величин, от локальной магнитуды M_L KAGSR, связанной с K_S линейным соотношением [Федотов, 1972]:

$$M_L = 0.5 K_S - 0.75. \quad (17)$$

Как было указано ранее, MLH непосредственно определяется для небольшого числа землетрясений, однако для этой магнитуды нет нижней границы в каталоге; кроме того, до 2004 г. область пересечения каталогов соседних филиалов была больше за счет того, что каталог Сахалинского филиала включал Северные Курилы. С 1981 по 2022 г. найдено 219 пар значений этих двух магнитуд в диапазонах $M_L = 3.9–6.6$ и $MLH = 3.1–6.7$ (см. рис. 7а). Для сравнения на рис. 7 приведена зависимость $M_S(BB)$ ЕССН от K_S , рассчитанная для территории Камчатки [Федотов, 1972],

$$M_S(BB) = 4.65 + 1.49 K_S, \quad (18)$$

и пересчитанная в зависимость $M_S(BB)$ от M_L по формуле (17). Как видно из рис. 7а, использование этой зависимости для современного курильского каталога даст заметное (на 0.2 м.е.) завышение значений MLH .

Проверим полученное соотношение транзитным пересчетом с использованием ранее полученных соотношений. Воспользуемся зависимостью $MLH(K_C)$ из работы [Сафонов, 2024],

$$MLH = 0.63 K_C - 2.37, \quad (19)$$

и полученной выше зависимостью $K_C(K_S)$ (16). Последовательный пересчет $M_L \rightarrow K_S \rightarrow K_C \rightarrow MLH$ позволяет получить зависимость (см. рис. 7а, зеленая линия), практически совпадающую с ранее найденной непосредственным сравнением данных каталогов.

Теперь получим соотношение для перехода от MLH к M_L с использованием в качестве прокси моментной магнитуды. Зависимость между M_L и региональной M_W приводится в работе [Абубакиров и др., 2018]:

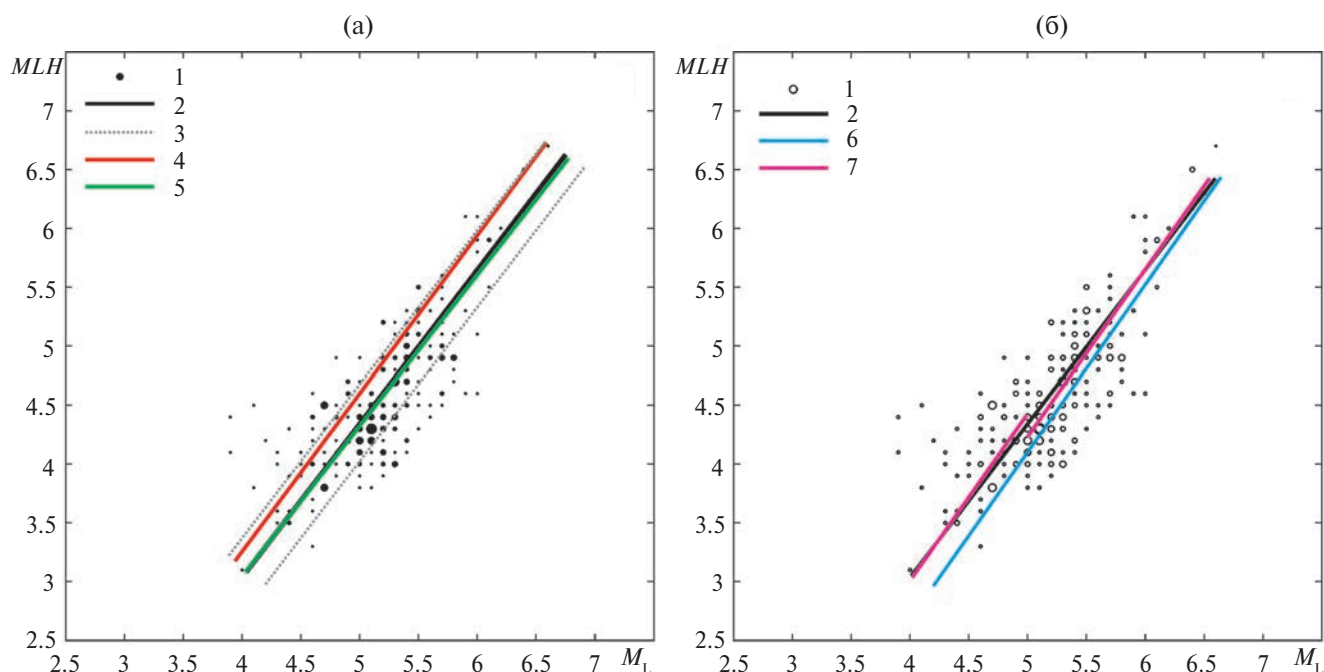


Рис. 7. Зависимость MLH Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН от M_L Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН. а – линейная зависимость $MLH(M_L)$: 1 – положение пар значений магнитуд; 2 – регрессионная прямая $MLH(M_L)$, полученная методом OSR; 3 – интервал стандартной ошибки регрессии Se ; 4 – вариант зависимости из работы [Федотов, 1972]; 5 – пересчет через энергетический класс. б – пересчет зависимости $MLH(M_L)$ через M_W : 6 – без поправки к M_W , 7 – с учетом поправки к M_W из статьи [Абубакиров и др., 2018].

$$M_W = M_L - 0.4. \quad (20)$$

Поскольку большая часть значений выборки (см. рис. 7) лежит в области умеренно-сильных событий, воспользуемся “нижней” частью полученной зависимости $MLH(M_W)$. Приравняв друг к другу моментные магнитуды соотношений (11) и (20), получим транзитную зависимость $MLH(M_L)$.

Как видно из рис. 7б (голубая линия), непосредственный пересчет $M_L \rightarrow M_W \rightarrow MLH$ дает существенную недооценку MLH . Причина в том, что зависимость $M_W(M_L)$ [Абубакиров и др., 2018] получена не для M_W^{GCMT} , а для моментной магнитуды, определяемой KAGSR двумя разными методами: 1) при региональной оценке тензора сейсмического момента центраида (M_W^{RSMT}); 2) через определение сейсмического момента по спектру для группы S-волн (M_W^{CB}). При этом для $M_L > 5$ взяты соответствующие значения M_W^{RSMT} , а для $M_L \leq 5$ – значения M_W^{CB} . Средняя разность в определении моментной магнитуды в сравнении с M_W^{GCMT} для этих двух методов составляет соответственно $\mu = -0.09$ и -0.23 м.е. [Абубакиров и др., 2018]. Учет этой поправки для пересчетной формулы позволяет получить линейную зависимость с разрывом в

значении $M_L = 5.0$, заметно лучше совпадающую с вариантом, полученным непосредственной регрессией выборки. Подобное сопоставление с учетом поправок к моментной магнитуде от определяющего агентства показывает принципиальную применимость формулы (11) для транзитных пересчетов.

Другими соседями SAGSR на южном фланге Курильской островной дуги являются Японское метеорологическое агентство (JMA), определяющее параметры землетрясений в широких окрестностях вокруг Японии, а также упоминавшееся выше агентство NIED. Магнитуда каталога JMA – M_j – строится на комбинировании нескольких магнитудных шкал, для землетрясений на локальных и региональных расстояниях в зависимости от величины события, глубины и эпицентрального расстояния.

Исследования показывают [Edwards, Rietbrock, 2009; Uchide, Imanashi, 2018], что магнитуда $M_j > 4.0$ для неглубоких землетрясений относительно неплохо соответствует M_W^{NIED} , недооценивая ее величину примерно на $\Delta M = 0.2-0.3$ м.е. Для более слабых событий зависимость становится нелинейной. Скорее всего, причина отклонения зависимости та же, что указывалась выше

для M_S , но несколько более сложная из-за комплексного характера современной шкалы M_j . В работе [Uchide, Imanashi, 2018] с использованием определений моментной магнитуды слабых ($M_W = 1.5\text{--}3.0$) неглубоких землетрясений получена зависимость $M_j(M_W)$ в виде полинома второй степени:

$$0.5 \leq M_j \leq 7.0 : M_W^{\text{NIED}} = 0.053(\pm 0.003), \\ M_j^2 + 0.33(\pm 0.02)M_j + 1.68(\pm 0.03). \quad (21)$$

На рис. 8а показаны пары значений $M_W(M_j)$ землетрясений в пределах Курило-Охотского региона с глубиной очага $h \leq 80$ км, произошедших в период с 1997 по 2022 г., по данным JMA, NIED [JMA, 2024; NIED, 2024]. Квадратами показаны средние значения, рассчитанные по выборкам, выделенным ортогонально линии 1:1 (путем разделения каталога по параметру $(M_W + M_j)/2$ на фрагменты в 0.2 м.е.). Как видно из этого рисунка, криволинейная зависимость $M_W(M_j)$ (синяя линия) хорошо отвечает только нижнему диапазону доступных данных $M_j < 4.6$, далее средние значения расположены вблизи

линии $M_W = M_j - 0.2$ (зеленая линия). В самом деле, если построить линейную зависимость по данным в диапазоне, показанном черными окружностями на рис. 8а, полученная линия (черная) практически совпадает с $M_W = M_j - 0.2$. Таким образом, можно при $M_j \leq 4.2$, $M_W \leq 4.0$ использовать зависимость (21) из работы [Uchide, Imanashi, 2018], а для $M_j > 4.2$, $M_W > 4.0$ — линейную:

$$M_W^{\text{NIED}} = M_j - 0.2. \quad (22)$$

На основе каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН и JMA получим зависимость $MLH(M_j)$. В каталогах за 1999–2022 гг. в пределах Курило-Охотского региона найдено 964 землетрясения, определенных одновременно с помощью MLH и M_j (см. рис. 8б) (использовались только значения MLH по данным как минимум трех сейсмостанций). В предположении, что стандартные ошибки определения MLH и M_j близки, методом OSR получена линейная зависимость $MLH(M_j)$:

$$MLH = 1.28(\pm 0.06) M_j - 1.86(0.29), \\ Se = 0.235, N = 964. \quad (23)$$

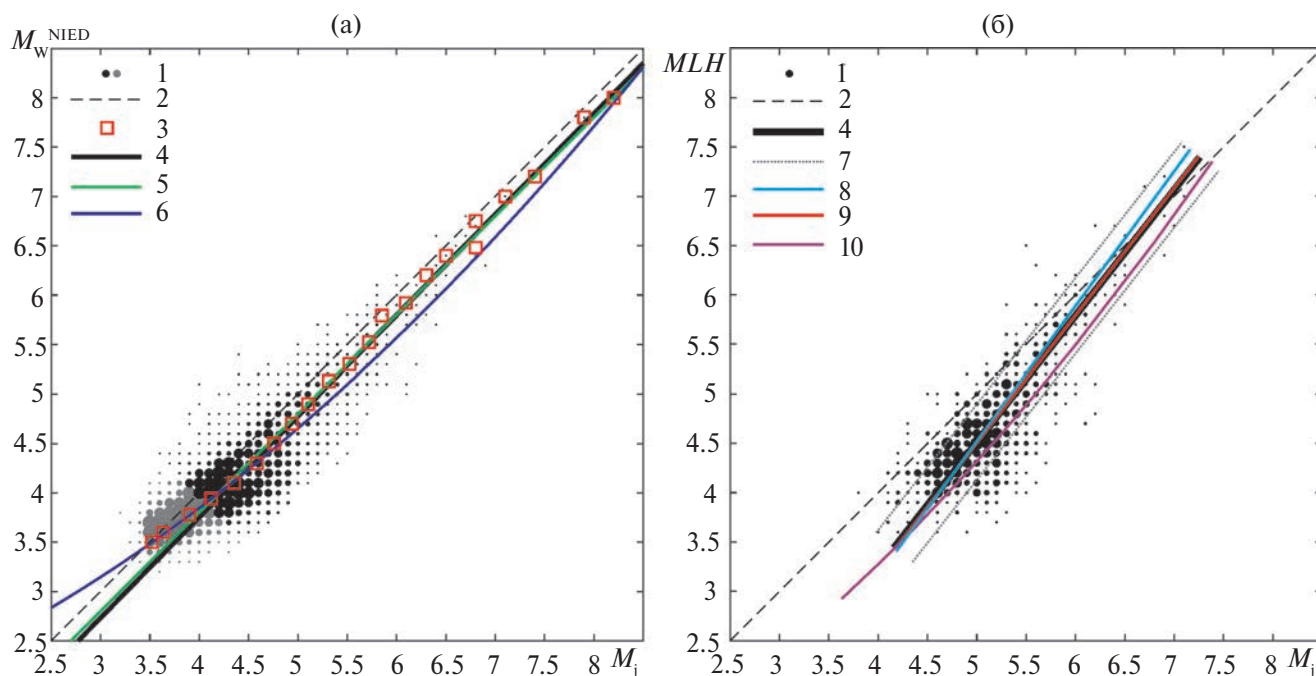


Рис. 8. Зависимости $M_W^{\text{NIED}}(M_j)$ (а) и $MLH(M_j)$ (б), полученные методом OSR, а также путем пересчета с помощью других соотношений.

1 — положение пар значений магнитуд (серым цветом отмечены данные, не задействованные в расчете регрессионной зависимости); 2 — линия равных значений магнитуд (1:1); 3 — среднее значение магнитуд на интервалах в 0.2 м.е., отложенных ортогонально линии (1:1); 4 — регрессионная прямая, полученная методом OSR; 5 — зависимость (22) из данной работы; 6 — зависимость $M_W^{\text{NIED}}(M_j)$ из статьи [Uchide, Imanashi, 2018]; 7 — интервал стандартной ошибки регрессии Se ; 8 — пересчет $MLH(M_j)$ через M_W^{GCMT} ; 9 — пересчет $MLH(M_j)$ через M_W^{NIED} ; 10 — пересчет $MLH(M_j)$ с использованием зависимости $M_W^{\text{NIED}}(M_j)$ из работы [Uchide, Imanashi, 2018].

По фактическому наличию данных эту зависимость можно использовать в интервалах $M_j = 4.5-7.0$ и $MLH = 4.0-7.0$.

Получим зависимость $MLH(M_j)$, используя в качестве прокси моментную магнитуду. Поскольку основные значения магнитуд находятся в указанном выше диапазоне, можно применить “нижнюю” зависимость $MLH(M_w^{GCMT})$ (11) и линейную зависимость $M_j(M_w^{NIED})$ (22) с поправкой из (8). Как видно из рис. 8б, пересчетная прямая довольно хорошо совпадает с линией регрессии в диапазоне слабых землетрясений, но расходится с ней приблизительно до $\Delta M = 0.2$ м.е на верхней границе применимости (11). С учетом разброса данных, значительной ошибки регрессии и большого количества пересчетов такое расхождение можно считать умеренным. Однако можно попробовать другой вариант пересчета, используя зависимость $MLH(M_w^{NIED})$ (14), полученную непосредственно. В этом случае (см. рис. 8б) пересчетная зависимость практически совпадает с линией регрессии. Также на рис. 8б приведена пересчетная кривая с использованием зависимости (21) [Uchide, Imanashi, 2018]. Как и ожидалось, исходя из положения этой линии на рис. 8а, наблюдается расхождение этой кривой и регрессионной прямой сразу после диапазона самых слабых землетрясений.

Таким образом, удалось продемонстрировать, что зависимость (11) можно использовать при транзитном пересчете магнитуды каталога Курило-Охотского региона СФ ФИЦ ЕГС РАН в энергетические характеристики землетрясений других агентств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена двухсегментная линейная зависимость (11), (12) между магнитудой по поверхностной волне MLH Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН (агентство SAGSR) и моментной магнитудой M_w агентства GCMT, дополненной данными NIED, скорректированными по найденному соотношению $M_w^{NIED}(M_w^{GCMT})$. Использовались данные каталогов 1968–2022 гг. в диапазонах магнитуд $MLH = 3.0-8.1$ и $M_w = 3.7-8.3$.

Вид зависимости обоснован методикой получения сравниваемых магнитуд, положением средних значений малых диапазонов каталога,

а также опытом получения подобной зависимости другими авторами.

Сопоставление полученной зависимости с аналогичными формулами $M_s(M_w)$ других авторов, полученными по данным длительных каталогов, показывает, что для наиболее сильных землетрясений ($MLH \geq 7.0$) сохраняется отмечавшееся ранее небольшое превышение MLH как аналога $M_s(BB)$ над $M_s(20)$ на ~ 0.1 м.е. На интервале $MLH = 4.0-6.2$ магнитуда MLH каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН Курило-Охотского региона имеет региональную специфику определения, приводящую к повышению ее значений на $\Delta M = 0.2-0.4$ м.е., по сравнению как с магнитудами M_s^{ISC} , M_s^{NEIC} глобальных каталогов, так и с выборкой M_s^{MOS} для Северной Евразии. Использование полученной зависимости для Курило-Охотского региона лучше отвечает реальным данным и позволяет точнее приводить энергетические характеристики региональных землетрясений SAGSR в соответствие с данными других агентств.

На основе выборок каталогов Сахалинского и Камчатского филиалов ФИЦ ЕГС РАН получены зависимости между энергетическими классами Федотова K_s и Соловьева K_c , а также магнитудами MLH и M_L в районе Средних и Северных Курильских островов. Для проверки полученных линейных соотношений произведен пересчет зависимости $MLH(M_j)$ через энергетические классы и через моментную магнитуду M_w . Полученные пересчетом соотношения с высокой точностью совпали с непосредственно рассчитанными регрессионными зависимостями. Лучший результат для M_w в качестве прокси-магнитуды удалось достичь после коррекции соотношений с учетом разницы определения этой магнитуды в GCMT и KAGSR.

На основе каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН и JMA получена линейная зависимость $MLH(M_j)$. Транзитным пересчетом через M_w удалось подтвердить расчетное соотношение, однако лучший результат дала не полученная ранее зависимость $MLH(M_w^{GCMT})$, даже с учетом коррекции при переходе от M_w^{GCMT} к M_w^{NIED} , а непосредственно полученная зависимость $MLH(M_w^{NIED})$. Такой результат был ожидаем, поскольку при транзитных пересчетах короткие цепочки чаще всего предпочтительнее длинных. И поскольку непосредственно рассчитанные соотношения

обычно лучше транзитных, полученные зависимости $MLH(M_L)$ и $MLH(M_f)$ можно также рекомендовать к использованию в границах Курило-Охотского региона в указанном диапазоне магнитуд.

Таким образом, удалось продемонстрировать, что полученная зависимость $MLH(M_w)$ при использовании в транзитном пересчете энергетических характеристик землетрясений по данным разных агентств позволяет получить достаточно точные результаты, сопоставимые с непосредственно полученными переходными формулами, меньше стандартной ошибки определения сравниваемых магнитуд. Вместе с предложенными ранее переходными соотношениями между магнитудой MLH и другими энергетическими характеристиками каталога Курило-Охотского региона полученная зависимость $MLH(M_w)$, доступная для всего диапазона магнитуд каталога, позволяет привести величину региональных землетрясений в соответствие с величинами других каталогов с учетом региональных особенностей ее определения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность рецензентам статьи за ценные комментарии и предложения, а также глубокую признательность Е.П. Семеновой, Н.В. Петровой и Л.Н. Зарочинцевой за любезно предоставленные данные.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного финансирования ИМГиГ ДВО РАН (№ ГР 124013000764-8) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Гусева Е.М., Павлов В.М., Скоркина А.А. Массовое определение моментных

магнитуд M_w и установление связи между M_w и M_L для умеренных и слабых камчатских землетрясений // Физика Земли. 2018. № 1. С. 37–51.

Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР / Ред. З.И. Аранович, Д.П. Кирнос, В.М. Фремд. М.: Наука, 1974. 244 с.

Ванек И., Затопек А., Карник В., Кондорская Н.В., Ризниченко Ю.В., Саваренский Е.Ф., Соловьев С.Л., Шебалин Н.В. Стандартная шкала магнитуд // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1962. № 2. С. 153–158.

Габсатарова И.П., Пойгина С.Г. Унификация сейсмологических каталогов по магнитуде // Землетрясения России в 2022 году. Обнинск: СФ ФИЦ ЕГС РАН, 2024. С. 145–148.

Горбунова И.В., Захарова А.И., Чепкунас Л.С. Магнитуды M_{LV} и M_{LN} // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. Т. 2. С. 87–93.

Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.

Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР / Отв. сост. Н.В. Кондорская, З.И. Аранович, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1982. 273 с.

Маловичко А.А., Петрова Н.В., Габсатарова И.П., Левина В.И., Михайлова Р.С., Курова А.Д. Сейсмичность Северной Евразии в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. 2023. Вып. 26 (2018–2019 гг.). С. 10–38.

<https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01>

Сафонов Д.А. Переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Курило-Охотского региона // Вопросы инженерной сейсмологии. 2024. Т. 51. № 2. С. 102–117.

<https://doi.org/10.21455/VIS2024.2-6>

Сафонов Д.А., Коновалов А.В. Использование программы ISOLA для определения тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 3. С. 102–112.

Сейсмологический каталог (сеть телесеизмических станций) / ФИЦ ЕГС РАН, http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_Catalog/ (дата обращения 05.08.2024).

Соловьев С.Л. Классификации землетрясений по величине их энергии // Тр. Геофиз. института АН СССР. 1955. № 30(157). С. 3–21.

Соловьев С.Л. О региональных отличиях калибровочной кривой для определения магнитуды землетрясений по поверхностным волнам // Магнитуда и

- энергетическая классификация землетрясений. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. Т. 2. С. 55–59.
- Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений // *Физика Земли*. 1967. № 2. С. 13–23.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2018–2019 гг. // *Землетрясения Северной Евразии*. 2023. Вып. 26 (2018–2019 гг.). С. 154–170.
<https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01>
- Фокина Т.А., Костылев Д.В., Коргун Н.В., Сафонов Д.А. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Приамурье и Приморье, Сахалин и Курило-Охотский регион // *Землетрясения России в 2022 году*. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024. С. 59–67.
- Халтурин В.И. Соотношения между магнитудными определениями, ожидаемые и наблюдаемые. Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. Т. 1. С. 145–153.
- Чубарова О.С., Гусев А.А., Викулина С.А. Двадцатисекундная региональная магнитуда $M_S(20R)$ для Дальнего Востока России // *Сейсмические приборы*. 2010. Т. 46. № 3. С. 58–63.
- Чубарова О.С., Гусев А.А. Региональная шкала магнитуд по поверхностным волнам для землетрясений Дальнего Востока России // *Физика Земли*. 2017. № 1. С. 60–71.
<https://doi.org/10.7868/S0002333716060028>
- Bondár I., Storchak D.A. Improved location procedures at the International Seismological Centre // *Geophys. J. Int.* 2011. V. 186. P. 1220–1244.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x>
- Bormann P., Wendt S., Di Giacomo D. Seismic sources and source parameters // *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)* / Ed. P. Bormann. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2013. P. 1–259.
https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch3
- Bormann P., Wylegalla K. Investigation of the correlation relationships between various kinds of magnitude determination at station Moxa depending on the type of instrument and on the source area // *Public. Inst. Geophys. Polish Acad. Sci.* 1975. V. 93. P. 160–175 (in German).
- Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Y.A., Levina V.I., Senyukov S.L., Sergeev V.A., Shevchenko Y.V., Yashchuk V.V. The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011 // *J. Volcanology and Seismology*. 2013. V. 7. № 1. P. 16–36.
<https://doi.org/10.1134/S0742046313010028>
- Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V. Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions // *Geophysical Research*. 2020. V. 21. № 3. P. 66–91.
- Cheng J., Rong Y., Magistrale H., Chen G., Xu X. An M_w -based historical earthquake catalog for Mainland China // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2017. V. 107. № 5. P. 2490–2500.
<https://doi.org/10.1785/0120170102>
- Das R., Wason H.R., Sharma M.L. Global regression relations for conversion of surface wave and body wave magnitudes to moment magnitude // *Nat. Hazards*. 2011. V. 59. P. 801–810.
- Di Giacomo D., Bondár I., Storchak D.A., Engdahl E.R., Bormann P., Harris J. ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009), III. Re-computed M_S and m_b , proxy M_w , final magnitude composition and completeness assessment // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2015. V. 239. P. 33–47.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.005>
- Di Giacomo D., Engdahl E.R., Storchak D.A. The ISC-GEM earthquake catalogue (1904–2014): status after the extension project // *Earth Syst. Sci. Data*. 2018. V. 10. P. 1877–1899.
<https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018>
- Edwards B., Rietbrock A. A comparative study on attenuation and source-scaling relations in the Kantō, Tokai, and Chubu regions of Japan, using data from Hi-net and KiK-net // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. V. 99. P. 2435–2460.
<https://doi.org/10.1785/0120080292>
- Ekström G., Dziewonski A.M. Evidence of bias in estimations of earthquake size // *Nature*. 1988. V. 332. P. 319–323.
- [GCMT] The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project, www.globalcmt.org (Access date: August 12, 2024).
- Gutenberg B. Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1945. V. 35. P. 3–12.
- Hall J. Linear Deming Regression // *MATLAB Central File Exchange*, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33484-linear-deming-regression> (Access date: August 5, 2024).
- Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84(B5). P. 2348–2350.
- [ISC] International Seismological Centre. On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- [JMA] Japan Meteorological Agency, <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html> (Access date: August 12, 2024).

- Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82(20). P. 2981–2987.
- Kanamori H.* Magnitude scale and quantification of earthquakes // *Tectonophysics*. 1983. V. 93. P. 185–199.
- Karnik V.* Seismicity of Europe and the Mediterranean. Czech Republic: Geophysical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, 1996. 28 p.
- Kubo A., Fukuyama E., Kawai H., Nonomura K.I.* NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application // *Tectonophysics*. 2002. V. 356. № 1–3. P. 23–48.
- Lolli B., Gasperini P., Vannucci G.* Empirical conversion between teleseismic magnitudes (m_b and M_s) and moment magnitude (M_w) at the Global, Euro-Mediterranean and Italian scale // *Geophysical Journal International*. 2014. V. 199. № 2. P. 805–828.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggu264>
- [NEIC] National Earthquake Information Center (NEIC) / USGS. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/national-earthquake-information-center-neic> (Access date: August 5, 2024).
- [NIED] F-net / National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. <http://www.fnet.bosai.go.jp> (Access date: July 21, 2024).
- Petrova N.V., Gabsatarova I.P.* Depth corrections to surface-wave magnitudes for intermediate and deep earthquakes in the regions of North Eurasia // *J. of Seismology*. 2020. V. 24. № 1. P. 203–219.
- Scordilis E.M.* Empirical Global Relations Converting M_s and mb to Moment Magnitude // *J. of Seismology*. 2006. V. 10. P. 225–236.
<https://doi.org/10.1007/s10950-006-9012-4>
- Uchide T., Imanishi K.* Underestimation of microearthquake size by the magnitude scale of the Japan Meteorological Agency: Influence on earthquake statistics // *J. of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018. V. 123. P. 606–620.
<https://doi.org/10.1002/2017JB014697>
- Wason H.R., Das R., Sharma M.L.* Regression relations for magnitude conversion for the Indian region // *Advances in Indian Earthquake Engineering and Seismology: Contributions in Honour of Jai Krishna*. Cham: Springer, 2018. P. 55–66.

THE RELATIONSHIP BETWEEN MAGNITUDES MLH AND M_w FOR THE KURIL-OKHOTSK REGION AND ITS USE FOR TRANSIT CONVERSIONS TO OTHER MAGNITUDES

D. A. Safonov

*Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS,
Nauki str., 1B, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Russia
e-mail: d.safonov@imgg.ru*

In order to unify the earthquake catalogue of the Kuril-Okhotsk region, the two-segment linear relationship was obtained between the surface wave magnitude MLH of the Sakhalin branch of the GS RAS and the moment magnitude M_w of the GCMT and NIED agencies. Comparison with similar formulas based on different catalogs shows that for strong $MLH = 6.5–8.1$ earthquakes, there is a slight ~ 0.1 excess of the regional magnitude of MLH over the M_s . In the interval $MLH = 4.0–6.5$, the regional magnitude MLH exceeds M_s values by 0.2–0.4. The relationships between MLH and M_L of the Kamchatka branch of the GS RAS in the region of the middle-northern Kuril Islands, MLH and M_j of the JMA agency for the southern part of the region were obtained. By transit recalculation using the relation $MLH(M_w)$, it was possible to repeat the directly obtained dependences with good accuracy. The best result is achieved by taking into account the differences in M_w obtained by different agencies.

Keywords: earthquake, magnitude scales, regression relationships, Kuril-Okhotsk region

УДК 551.215.6/504.455

КРАТЕРНЫЕ ОЗЕРА ХРЕБТА ВЕРНАДСКОГО О. ПАРАМУШИР (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА): ВОДНЫЙ БАЛАНС И ДИНАМИКА

© 2025 г. Т. А. Котенко

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия
e-mail: sinarka2017@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.04.2024 г.

После доработки 26.06.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

Рассматривается водный баланс вершинных кратерных озер хребта Вернадского, о. Парамушир. Для расчета приходной части были измерены осадки на высоте кратеров. Установлено, что необходимым условием существования постоянных холодных кратерных озер при количестве осадков ~4660 мм за гидрологический год является площадь водосбора более 60 тыс. м². Рассмотрена эволюция озер в кратерах действующего вулкана Эбеко. Дана оценка вулканического питания (притока воды и/или пара вулканического происхождения) термальных озер в предшествующие периоды времени и при современном состоянии вулкана. Установлено, что в перспективе Средний кратер и кратер Корбута подходят для формирования горячих озер, однако до окончания текущего извержения в кратере Корбута формирование озера в нем невозможно. В постэруптивный период при предполагаемом диаметре кратера 250 ± 50 м для равновесного существования озера с температурой 35°C и площадью зеркала 25 тыс. м² будет достаточен вулканический приток 8–13 кг/с. Поступление вулканического пара в оз. Горячее Среднего кратера регистрируется с 2017 г., однако озеро остается холодным. Показано, что вулканический приток должен составлять 5 ± 2 кг/с, чтобы было достигнуто балансовое равновесие для озера с температурой 35°C и площадью зеркала 25 тыс. м².

Ключевые слова: вулкан Эбеко, кратер, озеро, водный баланс, вулканический приток, орографическая составляющая осадков

DOI: 10.31857/S0203030625010037, EDN: GISSPR

ВВЕДЕНИЕ

Бессточные озера в кратерах действующих вулканов отличаются от обычных озер дополнительным источником питания — притоком воды и/или пара из вулкана (далее — вулканическим притоком), таким образом, их состояние напрямую отражает состояние вулканической активности. Целью большинства исследований активных кратерных озер является идентификация предвестников взрывной эруптивной активности. Определение предвестников возможно при четком понимании вклада как невулканических, так и вулканических компонентов, обеспечивающих баланс массы и энергии [Гавриленко, 2000; Pasternack, Varekamp, 1997; Hurst et al., 2015].

В северной части о. Парамушир в пределах хребта Вернадского существуют постоянные и временные кратерные озера, как холодные, так и горячие (см. рис. 1, рис. 2, табл. 1). Однако при достаточно большом количестве осадков (более 2000 мм/год у подножия хребта) постоянные озера находятся только в кратере Богдановича (см. рис. 2д) и кратерах вулкана Эбеко (см. рис. 2а, 2б, 2г). Остальные благоприятные для формирования водоемов структуры (см. табл. 1) в лучшем случае заполняются временными холодными озерами в период снеготаяния. Все горячие озера в последние 90 лет были приурочены к кратерам действующего вулкана Эбеко (оз. Горячее в Среднем кратере (см. рис. 1г (ГО1), рис. 2а), уже несуществующие

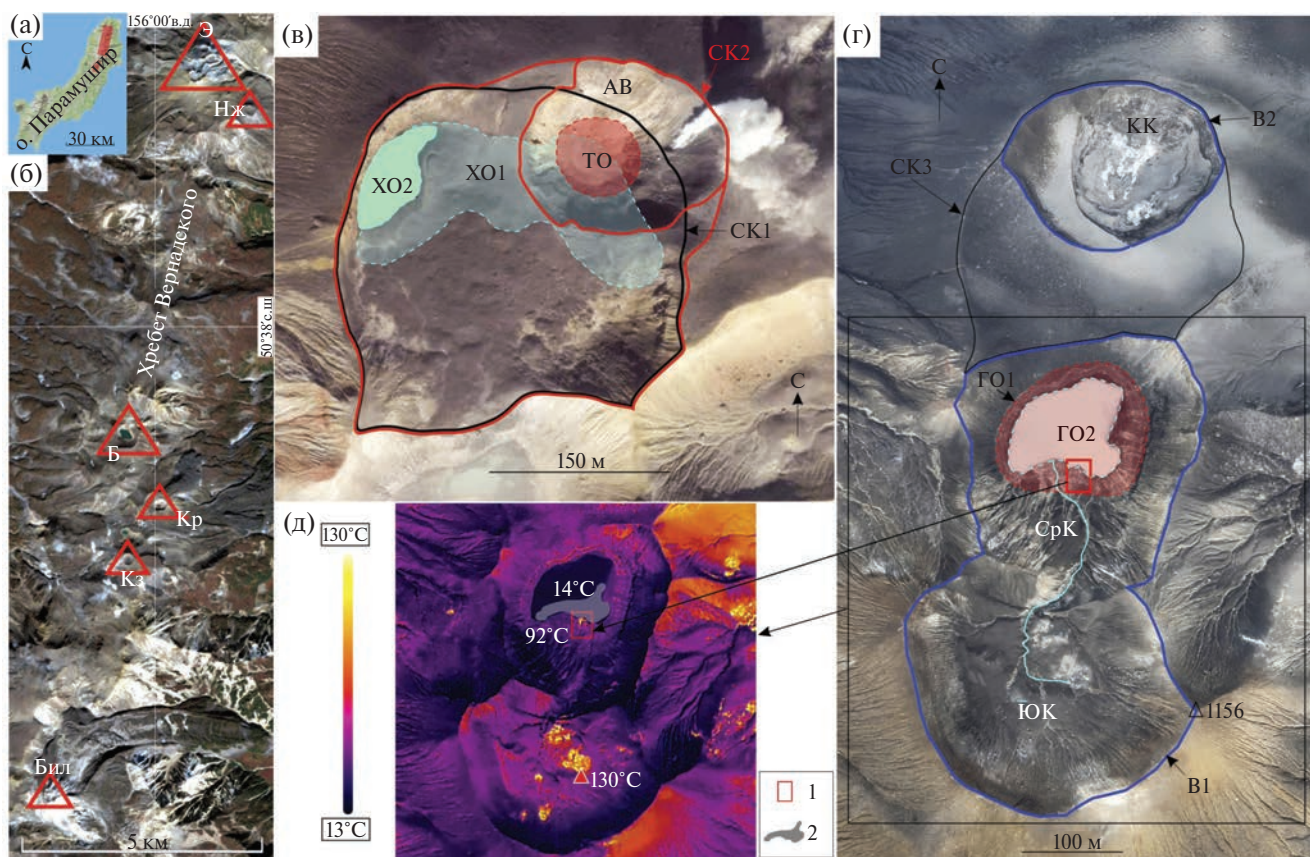


Рис. 1. Краáterные озера хребта Вернадского, о. Парамушир.

а – местоположение хребта Вернадского; б – вулканы с вершинными замкнутыми кратерами: Э – Эбеко, Нж – Неожиданный, Б – вулкан Богдановича, Кр – Крашенинникова, Кз – Козыревского, Бил – Билибина; в – озера в пределах Северного кратера вулкана Эбеко в 1952–2007 гг., отмеченные на спутниковом снимке Google Earth от 12.10.2012 г.: XO1 и XO2 – холодное озеро до 1967 г. [Сидоров, 1966] и после; CK1 и CK2 – Северный кратер до 1967 г. [Сидоров, 1966] и в 2012 г.; AB – Активная воронка в 1989–2016 гг.; TO – термальное озеро в AB в 2005–2007 гг.; г, д – аэрофотосъемка вулкана Эбеко 10 сентября 2023 г. в видимом и инфракрасном спектрах соответственно.

1 – береговая термальная площадка; 2 – участок видимой подводной газовой разгрузки; ГО1 и ГО2 – оз. Горячее в 1952 г. и в дату съемки; КК – кратер Корбута; CK3 – Северный кратер; CpK – Средний кратер; ЮК – Южный кратер; B1 и B2 – границы водосборов ГО и КК соответственно.

озера в Активной воронке (см. рис. 1в, рис. 2в) и в кратере Корбута (см. рис. 2г). Также здесь периодически существовали одновременно от одного до трех холодных озер в Среднем (см. рис. 2б) и Северном (см. рис. 1в) кратерах.

Начиная с середины прошлого века был выполнен целый ряд исследований оз. Горячее, в которых преимущественно рассматривалось изменение химического состава воды и уровня озера в связи с динамикой фумарольной и эруптивной активности вулкана [Башарина, Храмова, 1971; Иванов, 1957; Котенко, Калачева, 2021; Сидоров, 1966; Скрипка и др., 1966; Храмова, 1974]. Формирование кратерно-озерных отложений оз. Горячее и реликтовых озерных толщ Южного кратера и Восточного цирка изучались Г.М. Власовым [1960] и Г.Г. Храмовой

[1987]. О термальном озере в Активной воронке опубликована отрывочная информация относительно эпизодических измерений его температуры, химического состава, площади зеркала, глубины [Котенко и др., 2010; Меняйлов и др., 1967; Новейший ..., 2005]. Обзор хронологии существования термальных озер в пределах Северного кратера и динамика семимесячного существования горячего озера в молодом кратере Корбута в 2022 г. даны в работах [Котенко, Котенко, 2022; Котенко и др., 2023]. Единственный расчет водного и теплового баланса для оз. Горячее по состоянию на 1950-е гг. был выполнен в работе [Pasternack, Varekamp, 1997].

Эксплозивные извержения вулкана Эбеко в последние 100 лет главным образом были приурочены к Северному и Среднему кратерам,

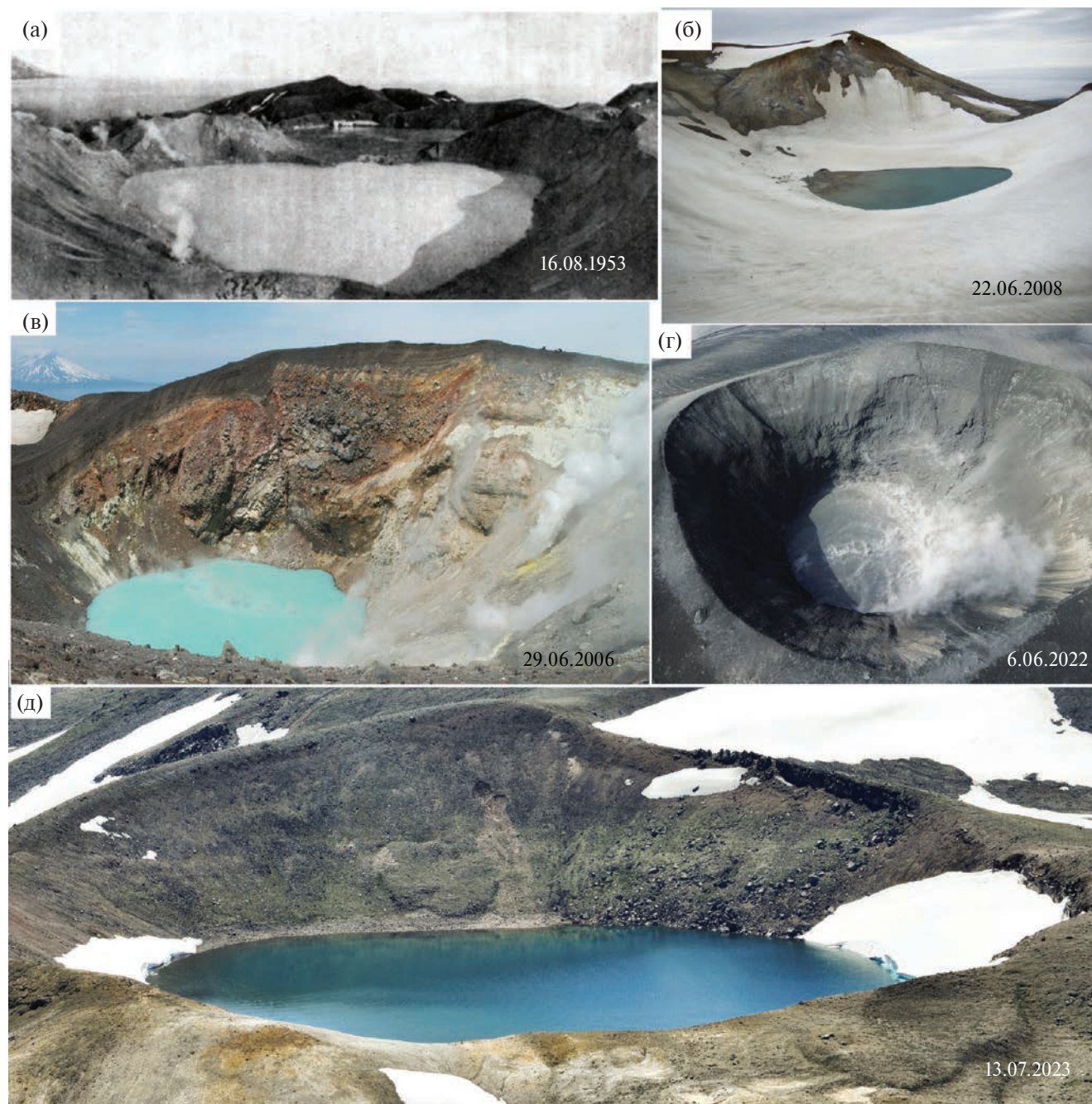


Рис. 2. Озера в кратерах вулкана Эбеко: оз. Горячее в Среднем кратере, на заднем плане – холодное озеро в Северном кратере [Горшков, 1958] (а); остывшее оз. Горячее (б); термальное озеро в Активной воронке (в); термальное озеро в кратере Корбута (г); оз. Маловодное, кратер вулкана Богдановича (д). Фото сделаны Л.В. Котенко (б, в, д) и М.Л. Котенко (г).

при этом целый ряд извержений (в 1965, 1967, 1989, 2006–2007, 2022 гг.) происходили или начинались в кратерных озерах [Башарина, Храмова, 1971; Котенко и др., 2010, 2023; Новейший ..., 2005; Скрипко и др., 1966].

Целью данного исследования является совершенствование мониторинга эруптивной активности в кратерах вулкана Эбеко, в некоторых

из которых постоянно, а в некоторых периодически существуют озера. В работе выполнена оценка составляющих водного баланса холодных и термальных кратерных озер вулкана, водный баланс которых напрямую зависит от вулканической активности. Особое внимание было уделено моделированию величины вулканического притока воды или пара, необходимого для существования горячих озер при

Таблица 1. Вершинные кратеры хребта Вернадского с постоянными или временными бессточными озерами

Вулкан	Озеро	Кратер	Период	Координаты (ф с.ш., л в.д.)	Кратер					Водосбор
					$H_{\text{макс}},$ м н.у.м.	Глубина, м	$D_{\text{с-ю}},$ м	$D_{\text{з-в}},$ м	$S,$ $\text{м}^2 \times 10^3$	$S,$ $\text{м}^2 \times 10^3$
Э	ГО1	СрК	1960	50° 41' 19.04", 156° 00' 53.14"	1100	100	270	250	58	106.6
Э	ГО2	СрК	2000–2016	50° 41' 19.04", 156° 00' 53.14"	1100	70	270	250	58	106.6
Э	ХО1	СК	1960*	50° 41' 26.84", 156° 00' 55.09"	1075	70	300	300	70.6	70.6
Э	ТО	АВ	2005–2006	50° 41' 29.33", 156° 00' 59.51"	1068	59	168	150	20.3	22
Э	КК	КК	01.05.2022	50° 41' 30.37", 156° 00' 55.44"	1103	100	214	244	39	39
Нж	прс	—	—	50° 40' 48.95", 156° 01' 46.79"	1075	28	210	188	30.2	30.2
Б	М	—	—	50° 37' 18.23", 156° 59' 45.27"	1120	63	460	420	172.5	177.3
Кр	прс	—	—	50° 37' 18.23", 156° 59' 45.27"	1072	62	270	240	53.6	53.6
Кз	прс	—	—	50° 35' 57.95", 156° 59' 48.08"	1154	43	240	240	44.4	44.4
Бил	прс	—	—	50° 33' 24.96", 155° 58' 32.33"	1080	40	246	240	51	51

Примечание. М — оз. Маловодное; прс — пересыхающее озеро; $H_{\text{макс}}$ — максимальная высота гребня; D — диаметр по гребню; S — площадь; * — данные из работ [Горшков, 1957; Новейший ..., 2005]. Другие индексы вулканов, кратеров вулкана Эбеко и озер см. на рис. 1.

современном состоянии кратеров вулкана. Чтобы получить актуальные данные об осадках на высоте кратеров, было проведено полевое измерение жидких осадков в течение трех с половиной месяцев 2023 г. на высоте 1020 м.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ

Хребет Вернадского занимает северную часть о. Парамушир. Его длина — 15 км, высота гребня — от 900 до 1156 м, ориентация — с северо-востока на юго-запад (17°) (см. рис. 1а, 1б). Хребет сформирован вулканической деятельностью линейно-гнездового типа плейстоцен-голоценового возраста [Новейший ..., 2005]. Часть потухших вулканов хребта Вернадского (см. рис. 1б) имеет вершинные кратеры, которые могли бы вмещать озера при достаточно высоком количестве выпадающих осадков. Кратеры вулканов имеют (или имели в прошлом, например Активная воронка вулкана Эбеко) диаметры от 128 до 460 м, глубины 40–100 м, площади водосборов от 0.02 до 0.18 км²

(см. табл. 1). Однако только кратер вулкана Богдановича заполнен постоянным холодным озером. Озеро Маловодное в кратере вулкана Богдановича — самое большое из озер хребта Вернадского с площадью зеркала в среднем 45.7 тыс. м² и площадью водосбора ~0.18 км² (высота зеркала — 1066 м, расстояние от вершины вулкана Эбеко — 7.3 км).

В северной части хребта расположен действующий, преимущественно, андезитовый вулкан Эбеко, характеризующийся частыми извержениями вулканического типа и извергающийся в настоящее время (<http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/volc?name=Ebeko>). В течение рассматриваемого времени его голоценовая постройка состояла сначала из трех последовательных кратеров, а начиная с 1967 г. — из четырех. В кратерах диаметрами 200–300 м и глубинами до 100 м периодически или постоянно наблюдалась интенсивная фумарольная деятельность, а также существовало от одного до трех озер с переменными термическим, химическим и

гидрологическим режимами [Иванов, 1957; Котенко и др., 2022; Меняйлов и др., 1988; Новейший ..., 2005; Опыт ..., 1966]. К концу мая 2024 г. сохранилось только одно кратерное озеро (оз. Горячее, Средний кратер) (см. рис. 1г, ГО2). Химический состав воды горячих озер при температуре воды $>25^{\circ}\text{C}$ (оз. Горячее в 1951–1956 гг. [Башарина, Храмова, 1971; Иванов, 1957; Сидоров, 1966; Скрипко и др., 1966; Храмова, 1974], озер в Активной воронке и кратере Корбута [Котенко и др., 2023; Котенко и др., 2010; Меняйлов и др., 1969]) характеризовался $\text{pH} < 2$ и минерализацией до 5 г/л. Температура воды холодных озер не превышает температуры воздуха (не более 15°C), минерализация воды составляет менее 0.5 г/л, $\text{pH} = 2.5\text{--}4$ [Котенко, Калачева, 2021]. Все холодные озера характеризуются значительными вариациями объема воды вплоть до кратковременного их исчезновения. Эруптивная активность вулкана Эбеко в последние 60 лет изменяла преимущественно морфологию Северного и Среднего кратеров, в результате изменялось количество озер, их локализация и размеры, физико-химические характеристики.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Площади кратеров, озер и водосборных бассейнов вычислялись с использованием открытых ГИС-источников (GOOGLE и SAGA), аэрофотосъемки 2022–2023 гг., выполненной с помощью БПЛА DJI Mavic 3 и 3T (см. табл. 1). Высота аэрофотосъемки составляла от 400 до 1500 м. Для съемки в видимом спектре на БПЛА была установлена широкоугольная камера Mavic 3t Hasselblad, с помощью которой получены снимки с разрешением 4000×3000 пикселей. Съемка термальной аномалии в Среднем кратере выполнена также с БПЛА в инфракрасном спектре в диапазоне 8–14 мкм с последующей обработкой снимков в программе DJI Thermal Analysis Tool 3. Разрешение тепловизионной камеры – 640×512 пикселей, точность измерения температуры – $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Для балансовых расчетов использовали данные полевых измерений температуры воды и метеопараметров в 2022–2023 гг. портативными цифровыми приборами: термометром с погружной хромель-алюмелевой термопарой, ручным ИК-термометром Кельвин-компакт

1200, метеостанцией SKYWATCH atmos. Также использованы открытые метеоданные и данные аэрологического зондирования ближайшей станции Росгидромета № 32215 “Северо-Курильск”, расположенной на высоте 23.8 м над уровнем моря на удалении от вулкана Эбеко 7 км (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

ЭВОЛЮЦИЯ ОЗЕР В КРАТЕРАХ ВУЛКАНА ЭБЕКО

В период с 1951 по 1956 г. [Горшков, 1957, 1958; Иванов, 1957] в Среднем кратере находилось термальное оз. Горячее (см. рис. 1г (ГО1), рис. 2а). Наблюдалась интенсивная газо-гидротермальная активность на дне озера и выше его уреза. Средняя температура воды составляла $30\text{--}35^{\circ}\text{C}$, в местах выходов гидротерм – до 90°C ($\text{pH} < 2$, минерализация – до 5 г/л). Благодаря высокому уровню воды происходил ее сток из Среднего кратера в Северный. Северный кратер был наполовину или менее заполнен холодным озером (см. рис. 1в, XO1).

В 1957–1964 гг. оба озера сохранялись, но в результате ослабления фумарольной активности в Среднем кратере происходило постепенное охлаждение оз. Горячее, объем воды в озере уменьшался, сток в Северный кратер прекратился [Опыт ..., 1966; Храмова, 1974]. Температура озерной воды в 1959–1960 гг. была уже $25\text{--}28^{\circ}\text{C}$, а в 1963–1964 гг. она составляла всего $18\text{--}20^{\circ}\text{C}$ [Опыт ..., 1966]. Холодное озеро в Северном кратере сохранялось, данные о его объеме, вариациях уровня отсутствуют, максимальная глубина достигала 7 м [Зеленов и др., 1965].

1965–1988 гг. 8 августа 1965 г. в Среднем кратере произошло фреатическое извержение, в результате которого уровень оз. Горячее понизился на 10–11 м с потерей 90% объема [Скрипко и др., 1966]. После извержения фумарольная деятельность в кратере значительно сократилась. Температура воды озера еще в начале этого периода составляла $17\text{--}20^{\circ}\text{C}$, после 1970 г. она стала близка к температуре воздуха, зимой озеро стало замерзать [Меняйлов и др., 1969, 1988]. В 1967 г. в северо-восточной части Северного кратера произошло эксплозивное извержение, в результате которого сформировался новый кратер Активная воронка (см. рис. 1в, АВ).

Восточная часть холодного озера была засыпана пирокластикой, а площадь озера уменьшилась более чем в три раза (см. рис. 1в, ХО1 и ХО2) [Меняйлов и др., 1969]. В Активной воронке после окончания извержения образовалось горячее озеро с мощной постэруптивной фумарольной разгрузкой на дне. Это озеро сохранялось даже во время извержения, начавшегося в Активной воронке в октябре 1987 г. [Меняйлов и др., 1988; Новейший ..., 2005].

1989–2004 гг. В 1989 г. извержение в Активной воронке усилилось и его жерло переместилось с восточной стенки на дно кратера. В результате озеро в Активной воронке было уничтожено [Новейший ..., 2005]. Холодные озера в Среднем и Северном кратерах были засыпаны в 1989 г. пирокластикой этого извержения [Новейший ..., 2005], но впоследствии восстановились. Гидрологический режим оз. Горячее характеризовался сильными вариациями объема воды вплоть до исчезновения в августе – начале сентября.

2005 г. – июнь 2007 г. Фреатические извержения в Активной воронке сопровождались возобновлением фумарольной активности на ее дне и появлением термального озера (см. рис. 1в (ТО), рис. 2в) с максимальной глубиной 15 м. В июле 2007 г. фумарольная активность на дне кратера прекратилась и термальное озеро исчезло [Котенко и др., 2010].

Июль 2007 г. – сентябрь 2016 г. В этот период сохранялись только холодные озера в Среднем и Северном кратерах и маленькое сезонное озеро в Активной воронке, пересыхающее после исчезновения питающего его снежника. В середине июля 2011 г. в Среднем кратере произошли четыре гидротермальных взрыва, причем два из них – подводные, оставившие после падения уровня воды обособленные маары глубиной до 4 м, заполненные кислой холодной водой с минерализацией ~3 г/л. Гидрологический режим оз. Горячее после этого не изменился, термальные проявления на дне кратера по-прежнему отсутствовали [Котенко и др., 2022].

Октябрь 2016 г. – август 2018 г. Началось новое извержение вулканического типа, которое происходило одновременно из трех жерл: два из них находились в Среднем кратере и одно – в Активной воронке. В июне 2017 г. жерла в Среднем кратере прекратили быть активными, кратер

заполнился холодным озером, но в южной части озера появилась слабая газовая разгрузка [Котенко и др., 2022]. Сохранилось холодное озеро в Северном кратере.

Сентябрь 2018 г. – декабрь 2023 г. В ходе продолжающегося эксплозивного извержения рядом с Активной воронкой начал формироваться новый активный кратер – кратер Корбута, взрывы из которого засыпали Активную воронку и холодное озеро Северного кратера (см. рис. 1г) [Котенко и др., 2022]. В Среднем кратере сохранялась слабая газовая разгрузка в оз. Горячее, но озеро оставалось холодным [Котенко, Калачева, 2021]. С 17 ноября 2021 г. по 21 января 2022 г. на вулкане Эбеко наблюдалась только фумарольная активность [Котенко, Котенко, 2022; Котенко и др., 2023] с сохранением мощной постэруптивной фумарольной разгрузки в кратере Корбута с расходом ~16 кг/с. Величина эмиссии из кратера Корбута была получена методом сравнения площадей проекций аэрозольных шлейфов на горизонтальную плоскость [Hochstein, Bromley, 2001]. Площади проекций шлейфов фумарол кратера Корбута, а также крупных фумарол Южного кратера и восточных склонов вулкана вычислялись по аэрофотосъемке. Для верификации данных для доступных фумарол проводилось прямое измерение расходов газа по скорости струй, их температуре и размеру выходного отверстия согласно работе [Нехорошев, 1960]. Фумарольная разгрузка и обильные осадки способствовали возникновению в кратере горячего озера с температурой воды ~43°C (см. рис. 2г). В конце января 2022 г. в кратере Корбута возобновилась эруптивная активность, начавшаяся с подводных гидротермальных взрывов. В середине июня стали происходить взрывы вулканического типа значительной силы, в результате которых озеро перестало существовать [Котенко и др., 2023]. В итоге в 2023 г. сохранилось одно озеро – оз. Горячее в Среднем кратере с газовой разгрузкой в южной части озера (см. рис. 1д). Температура воды в озере по-прежнему невысокая, но выше температуры воздуха на несколько градусов. Так, в июне 2023 г. она составляла 13°C относительно средней измеренной температуры воздуха в этот день 4.5°C и при наличии постоянного притока талой воды со снежника. Падение уровня озера в начале июля 2023 г. привело к обнажению части слабых газовых

выходов. Термальная аномалия на этом участке уверенно фиксировалась на термоснимках с БПЛА с июля по сентябрь (см. рис. 1д). Максимальная температура на аномальном участке с введением поправки на атмосферное поглощение составила $\sim 92^\circ\text{C}$, температура поверхности озера $\sim 14^\circ\text{C}$ при температуре воздуха 11°C .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Водный баланс

Баланс массы бессточного кратерного озера определяется равенством входных и выходных составляющих [Гавриленко, 2000; Hurst et al., 2015; Pasternack, Varekamp, 1997] и может быть представлен в виде

$$M_{\text{вул}} + M_{\text{ос}} + M_{\text{сток}} = M_{\text{исп}} + M_{\text{ф}}, \quad (1)$$

где входные компоненты водного баланса: $M_{\text{вул}}$ — вулканический приток воды и/или пара, $M_{\text{ос}}$ — осадки, выпадающие на поверхность озера, $M_{\text{сток}}$ — осадки, стекающие в озеро из водосборного бассейна; а выходные компоненты: $M_{\text{исп}}$ — испарение с поверхности озера, $M_{\text{ф}}$ — фильтрация через дно озера. Для холодных озер в неактивных кратерах (например, оз. Маловодное) $M_{\text{вул}} = 0$, в остальных случаях эта величина искомая.

Вклад атмосферных осадков. Среднее за гидрологический год (начало — 1 ноября) количество осадков для высоты стационарной метеостанции (23.8 м н.у.м.) составляет 2024.5 мм (осреднение за период с 1975 по 2022 г.). Высота зеркала кратерных озер близка к 1000 м, они расположены на вершине хребта Вернадского длиной 15 км и с высотой гребня от 900 до 1156 м, ориентированного с юго-запада на северо-восток ($\sim 17^\circ$). Хребет Вернадского представляет собой орографический барьер для влагонесущих потоков, преобладающие направления которых квазиперпендикулярны хребту: в период с августа по апрель преобладают западные и северо-западные направления ветра, а с мая по июль восточные и юго-восточные [Научно-прикладной ..., 1990]. Ветровой режим о. Парамушир соответствует наиболее благоприятным условиям для орографического усиления осадков с ростом высоты препятствия [Barry, 2008] в результате: 1) адиабатического

охлаждения и конденсации при вынужденном подъеме устойчиво стратифицированных влажных воздушных масс на орографическом барьере; 2) усиления конвекции в условиях турбулентного потока; 3) образования орографической облачности при возникновении горной волны (волны препятствия) в атмосфере над препятствием [Бернгард, 2004; Мусаелян, 1962]. На Курильских островах первый процесс наиболее характерен для теплого сезона, второй — для холодного, а третий не имеет сезонных приоритетов [Научно-прикладной ..., 1990]. В целом ряде исследований для невысоких прибрежных хребтов, аналогичных хребту Вернадского, наблюдалось увеличение осадков над их вершинами на 60–300% [Bruintjes, 1994; Minder et al., 2008].

Непосредственно на вулкане Эбеко инструментально атмосферные осадки до сих пор не измерялись. В 2023 г. осадкомер был установлен на высоте 1020 м на расстоянии 1.1 км к юго-востоку от вулкана. Измерения проводились с 16 июня по 5 октября 2023 г. сразу после периодов сильных или продолжительных осадков, зафиксированных на метеостанции в Северо-Курильске (9 измерений). Коэффициенты приращения жидких осадков (отношение суммы осадков на высоте 1020 м к осадкам, измеренным на стационарной метеостанции) варьировали от 1.3 до 3.1, среднее значение — 2.3. Для оценки зимних осадков были рассмотрены результаты работы [Сучков, 1999], в которой в результате балансовых наблюдений на малых ледниках хребта Вернадского в течение 1985–1988 гг. были получены суммы твердых осадков для высоты 950 м, превышающие данные метеостанции в среднем в 3.17 раза. Данные были получены из снегозапаса перед началом абляции, т.е. уже с учетом таких значимых факторов, как потери на испарение с поверхности снежного покрова и метелевое испарение снега [Гляциологический ..., 1984]. Однако ледники приурочены к областям максимального снегонакопления на подветренном склоне в результате метелевого переноса снега [Гляциологический ..., 1984]. Механизмы снегонакопления в кратерах и склоновых снегоборных бассейнах значительно отличаются [Рыбак и др., 2019], и ориентироваться на данные, полученные в работе [Сучков, 1999], для нашего исследования будет неверным, так как

это приведет к завышению количества осадков. Поэтому для оценки величины зимних осадков были привлечены результаты измерений Росгидромета в зимний сезон 1987–1988 гг. на высоте 900 м, представленные в фондовых материалах СахУГМС¹. По этим наблюдениям вариации коэффициента приращения твердых осадков составили 1.6–3.2. В итоге был принят средний коэффициент приращения всех видов осадков 2.3, что дает 4656 мм осадков за гидрологический год.

Следует учесть также потери за счет испарения со снежного покрова [Дюнин, 1963; Постников, 2016], которые могут быть значительными. На основе натурных наблюдений и математического моделирования [Лавров, 2023] установлен наиболее значимый метеорологический фактор, определяющий испарение с поверхности снега, — это дефицит влажности воздуха (коэффициент корреляции — 0.59–0.82). Это позволяет использовать для оценки сублимации снега за длительный период формулу А.Н. Постникова [2016]

$$E = 0.31nd, \quad (2)$$

где E — испарение (в мм), n — число суток с установившимся снежным покровом, d — дефицит влажности воздуха (в гПа). Дефицит влажности воздуха на высоте 1 км за 2017–2023 гг., по данным аэрологического зондирования АЭ “Северо-Курильск” Росгидромета (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), составлял в разные месяцы от 3.7 до 5.5 гПа (продолжительность периода — 240 сут), что дает суммарное испарение с поверхности снега ~350 мм. Это снижает годовую сумму осадков до 4306 мм и дает норму осадков $m_{oc} = 1.37 \cdot 10^{-4}$ кг/с/м² (табл. 2).

В случае холодного озера потери за счет испарения с поверхности снега были вычтены из общей суммы осадков. При термальном незамерзающем озере внутри закрытой чаши кратера весьма вероятно более высокая влажность воздуха и, соответственно, более низкий дефицит влажности: так, при относительной влажности воздуха 80% (дефицит ~2 гПа) испарение с поверхности снега снижается более чем в два раза (~150 мм). Также расчет испарения должен

быть применен к части водосбора за вычетом площади незамерзающего озера, занимающего 15–35% (см. табл. 2). Таким образом, потери на испарение снега перестают быть значимой величиной. Сумма осадков при балансовых расчетах для термальных озер была принята равной 4656 мм (см. табл. 2).

Сток осадков в озеро из водосборного бассейна. К осадкам, стекающим в озеро с площади водосбора, был применен коэффициент α , показывающий долю поверхностного стока от общего количества осадков. Согласно работе [Вакин, Сугробов, 1972], поверхностный сток со склонов вулканов составляет в среднем 2/3 от количества осадков, а оставшаяся часть приходится на инфильтрацию, поэтому в расчетах был принят коэффициент $\alpha = 0.67$.

Испарение с поверхности озера. Наличие испарения с поверхности холодных кратерных озер хребта Вернадского лимитировано периодом открытой от льда и снега поверхностью воды и уровнем нулевой изотермы осенью, что составляет период около трех месяцев (июль–сентябрь). Расчет испарения за длительный период времени (мм) может быть вычислен по формуле ГГИ [Указания ..., 1969]

$$E = 0.14n(e_0 - e_1)(1 + 0.72W), \quad (3)$$

где n — число суток; e_0 — максимальная упругость водяного пара над водной поверхностью при температуре поверхности воды, мбар; e_1 — абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м над водной поверхностью, мбар; W — скорость ветра на высоте 2 м над водной поверхностью (принята величина 2.5 м/с, так как пространство внутри кратера закрыто от ветра). Средняя величина испарения за сезон составила ~125 мм. Скорость испарения с холодных озер (см. табл. 2) при средней температуре поверхности воды 9°C, воздуха 11°C и средней относительной влажности воздуха 60% для 92 суток составила 0.7 кг/с для оз. Маловодное и 0.6 кг/с для озера в Северном кратере (см. рис. 1в, XO1).

Испарение с поверхности горячего озера намного превышает испарение с холодной поверхности воды [Гавриленко, 2000; Hurst et al., 2015; Terada et al., 2012]. Для оценки испарения с горячих озер применяется целый ряд формул, подробный разбор которых дан в работе [Hurst

¹ Технический отчет снеголавинной группы ГМБ “Северо-Курильск” за зимний сезон 1987–1988 гг. 132 с.

Таблица 2. Составляющие водного баланса кратерных озер хребта Вернадского

Озеро	Год	T _{оз} , °C	Кол-во осадков, мм/год	кг/с/м ² (×10 ⁻⁴)			m _{исп}	S _{оз}	S _{вдсб}	M _{ос}	M _{сток}	M _ф	M _{исп}	M _{бул}
				m _{ос}	m _ф	m _{исп}								
М	—	9	4306	1.37	3.8	—	—	45.7	177.3	6.3	12	17.6	0.7	—
	1960	9	4306	1.37	2.2	—	—	35	70.6	4.8	3.3	7.5	0.5	—
ГО1	1952	35*	4656	1.48	2/3.8	3.8	3.8	30*	106.6	4.4	7.6	6/11.4	11.4	5.4/10.8
	модель	35	4656	1.48	2/3.8	3.8	3.8	25	106.6	3.7	8.1	5/9.5	9.5	2.7/7.2
			4656	1.48	2/3.8	3.8	3.8	20	106.6	2.9	8.6	4/7.6	7.6	0.1/3.7
ТО	2005–2006	40	4656	1.48	2	5.2	5.2	4.3	22	0.6	1.8	0.9	2.2	0.7
			4656	1.48	2	5.2	5.2	6	22	0.9	1.6	1.2	3.1	1.8
КК	2022	53	1967	0.6	2	11.1	11.1	6.3	39	0.4	1.4	1.3	7.0	6.5
		61	1967	0.6	2	17.1	17.1	6.3	39	0.4	1.4	1.3	10.8	10.3
	модель	43	4656	1.48	2/3.8	6.3	6.3	6.4	50	0.9	4.3	1.3/2.4	4	0.1/1.2
			4656	1.48	2/3.8	6.3	6.3	7.4	50	1.1	4.2	1.5/2.8	4.6	0.8/2.2
			4656	1.48	2/3.8	6.3	6.3	8	50	1.2	4.1	1.6/3	5	1.3/2.7
			4656	1.48	2/3.8	6.3	6.3	9.4	50	1.4	4	1.9/3.6	5.9	2.4/4.1
		35	4656	1.48	2/3.8	6.3	6.3	15	50	2.2	3.4	3/5.7	9.4	6.8/9.5
			4656	1.48	2/3.8	3.8	3.8	9.4	50	1.4	4	1.9/3.6	3.6	0.1/1.7
			4656	1.48	2/3.8	3.8	3.8	15	50	2.2	3.5	3/5.7	5.7	3/5.7
			4656	1.48	2/3.8	3.8	3.8	25	50	3.7	2.5	5/9.5	9.5	8.3/12.8

Примечание. * – данные из работ [Горшков, 1958; Pasternack, Varekamp, 1997].
Индексы озер см. в табл. 1 и на рис. 1.

et al., 2015]. Скорость испарения $m_{\text{исп}}$, полученная по одной из них [Ryan et al., 1974], варьировала при различных граничных условиях в пределах $(3.8-17.1) \cdot 10^{-4}$ кг/м²/с, а для разных объектов — от 2.2 до 11.4 кг/с (см. табл. 2).

Фильтрация через дно озера. Для холодных бессточных озер дренаж через дно озера равен поступлению осадков на водосборную площадь за вычетом испарения [Указания ..., 1969]. Рассчитанная скорость инфильтрации для оз. Маловодное ($m_{\text{ф}} = 3.8 \times 10^{-4}$ кг/м²/с) значительно больше, чем для холодного озера в Северном кратере (2.2×10^{-4} кг/м²/с) по состоянию на 1960 г. (см. табл. 2). Второе значение близко к величине 2×10^{-4} кг/м²/с, полученной в результате прямых измерений для термального озера Югама в Японии [Nigayama et al., 2020]. Необходимо учитывать, что в котловине оз. Маловодное не наблюдается фумарольная или гидротермальная активность, а в Северный кратер в 1952–1959 гг. наблюдался сток термальной высокоминерализованной воды из озера Среднего кратера [Зеленов и др., 1965; Храмова, 1974]. Существенным фактором высокой величины просачивания в этом случае, вероятно, является отсутствие химической контаминации трещин и пор, уменьшающей фильтрационные способности донных отложений. Инфильтрацию, полученную для холодных озер, можно принять за фактическую для начального периода жизни горячих озер в молодом кратере сразу после окончания его извержения. Впоследствии из-за уменьшения этой части расхода для поддержания баланса термального озера потребуется меньшее количество термального флюида (см. рис. 3). То есть, в случае ослабления вулканического притока в озеро, его потеря может быть частично сбалансирована уменьшением инфильтрации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Очевидно, что в климатических условиях северной части о. Парамушир площадь водосбора <60 тыс. м² не может обеспечить стабильное существование холодного озера на высоте около 1 км только за счет метеорной компоненты. Поэтому в кратерах вулканов Неожиданный, Козыревский, Билибина и Крашенинникова, где не наблюдается гидротермальная активность,

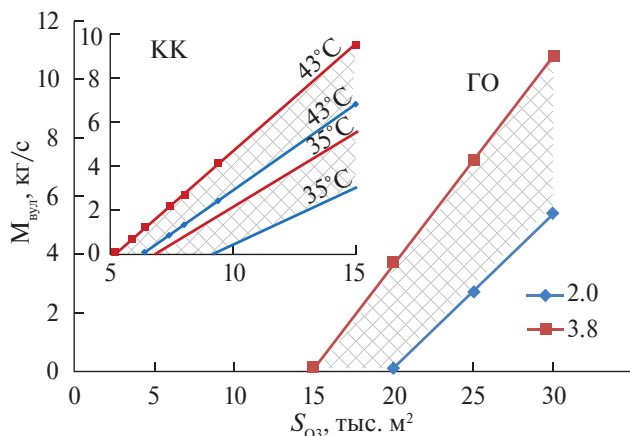


Рис. 3. Вулканический приток относительно площади озера при разной скорости инфильтрации для оз. Горячее (ГО) и озера в кратере Корбута (КК). 2 и 3.8 — скорости инфильтрации (в кг/м²/с $\times 10^{-4}$).

образуются только сезонные талые озера, время жизни которых не превышает двух месяцев.

Формула водного баланса для термальных озер вулкана Эбеко имеет вид

$$M_{\text{вул}} = m_{\text{исп}} \cdot S_{\text{оз}} + m_{\text{ф}} \cdot S_{\text{оз}} - m_{\text{ос}} \cdot S_{\text{оз}} - 0.67m_{\text{ос}} \cdot (S_{\text{вдсб}} - S_{\text{оз}}), \quad (4)$$

где $m_{\text{ф}} = 2 (3.8) \times 10^{-4}$, а скорость испарения с поверхности озера

$$m_{\text{исп}} = \frac{E_{\text{исп}}}{L}, \quad (5)$$

где $E_{\text{исп}}$ (Вт/м²) — потери тепла на испарение с поверхности озера, L — скрытая теплота испарения воды при температуре 40°C (2.38 МДж/кг). Формулы расчета $E_{\text{исп}}$ по работе [Ryan et al., 1974]:

$$E_{\text{исп}} = \left(2.7(T_v - T_{v1})^{\frac{1}{3}} + 3.2W \right) (e - e_1), \quad (6)$$

$$T_v = T / (1 - 0.378e/P), \quad (7)$$

где T_v и T_{v1} — виртуальные температуры для озера и для воздуха на высоте 2 м над поверхностью озера; T — температура озера или воздуха в градусах Кельвина; W (м/с) — скорость ветра на высоте 2 м над поверхностью озера; e и e_1 (мбар) — давление насыщенного водяного пара при температуре озера и давление водяного пара для воздуха на высоте 2 м над водной поверхностью при заданной влажности; 2.7 и

3.2 — эмпирические коэффициенты; P (мбар) — атмосферное давление.

В этой работе для расчетов было принято атмосферное давление 912 мбар, скорость ветра и влажность воздуха на высоте 2 м над озером — 2.5 м/с и 60% соответственно, среднегодовая температура воздуха — 0°C.

Расчет водного баланса кратерных озер представлен в табл. 2. В результате балансовых расчетов были получены предполагаемые минимальные разгрузки вулканического флюида для термальных озер вулкана Эбеко в разные периоды времени. Приток вулканической воды или пара варьировал от 0.7 кг/с для самого маленького озера, которое существовало в Активной воронке в 2005–2006 гг., до 10.3 кг/с для извергающегося озера в кратере Корбута в 2022 г. при скорости инфильтрации 2×10^{-4} кг/м²/с. Для оз. Горячее по состоянию на 1952 г. поступление вулканического флюида могло составлять от 5.4 до 10.8 кг/с в зависимости от скорости инфильтрации.

Для кратера Корбута парогазовая разгрузка (~16 кг/с) был измерена в ноябре–декабре 2021 г. после окончания извержения и перед заполнением его озером [Котенко и др., 2023]. По состоянию на 1 мая 2022 г. площадь озера в этом кратере составляла 6.3 тыс. м², температура поверхности воды (43°C) была измерена с кромки кратера инфракрасным термометром. Коэффициент ослабления для расстояния 80 м до поверхности воды с учетом угла измерения менее 90° и сильного парения мог составлять 0.7–0.8 [Harris et al., 2009]. То есть фактическая температура воды, вероятно, была 53–61°C, обеспечивая испарение с поверхности озера от 7 до 10.8 кг/с. На 1 мая 2023 г. вулкан уже находился в стадии извержения [Котенко и др., 2023]: несколько раз в сутки в кратере происходили взрывы, формирующие выбросы в виде “петушиного хвоста”, обычные для гидровулканических извержений в кратерных озерах. Поэтому наблюдалась высокая температура воды (>45°C), характерная для извергающихся активных кратерных озер [Pasternack, Varekamp, 1997], не живущих длительное время. Сумма осадков взята за период с 20 ноября 2021 г. (дата прекращения взрывов в кратере) по 1 мая 2022 г. (дата полевых наблюдений) с учетом орографического коэффициента. Расчет дает вулканический

приток 8.4 ± 2 кг/с, при этом часть фумарол находилась на стенках кратера выше уреза озера и не принимала участие в его питании (см. рис. 1е).

Следующим шагом было моделирование возможности появления термальных озер при современном состоянии кратеров вулкана (см. табл. 2, рис. 3).

Кратер Корбута по состоянию на октябрь 2023 г. имел размер 240×210 м и глубину ~100 м. Извержение продолжается, и мы не можем знать окончательную морфологию кратера после прекращения эксплозий. Но, исходя из истории эруптивной активности вулкана Эбеко, можем предположить, что диаметр кратера будет составлять 250 ± 50 м подобно другим кратерам с глубиной 100 м или менее [Belousov et al., 2021]. В табл. 2 представлены расчеты составляющих водного баланса в зависимости от площади и температуры озера. Так, для существования в кратере озера с площадью зеркала 15 тыс. м² и температурой воды 43°C достаточно поступление вулканического флюида от 7 до ~10 кг/с (при разной скорости инфильтрации); при температуре воды в озере 35°C вулканический приток снижается в среднем в два раза. То есть если скорость просачивания через дно озера в начальный период времени после окончания текущего извержения будет высокая (3.8×10^{-4} кг/м²/с), то для поддержания балансового равновесия потребуется более высокий вулканический приток (см. рис. 3).

Озеро Горячее. По состоянию на 19 сентября 2023 г. оз. Горячее имело площадь зеркала 11.3 тыс. м² и температуру поверхности 14°C, что на 3°C выше температуры воздуха. Очевидно, что парогазовая разгрузка в озеро недостаточна для его значительного прогрева. Вклад вулканической компоненты от 2.7 до 5.4 кг/с мог бы обеспечить существование термального озера (35°C) с площадью зеркала 25 и 30 тыс. м² соответственно при скорости инфильтрации 2×10^{-4} кг/м²/с (см. табл. 2, рис. 3). При более высокой скорости просачивания (3.8×10^{-4} кг/м²/с) потребуется как минимум двойное превышение этого вулканического вклада в питание озера (см. табл. 2, рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вулкан Эбеко — один из самых активных вулканов Курильских островов, имеющий одновременно от одного до трех кратерных озер. Наличие озер в его кратерах может определять характер вулканической активности, а также представлять угрозу в виде лахаров. Для усовершенствования мониторинга активности кратерных озер вулкана Эбеко были определены составляющие водного баланса холодных и горячих озер самого вулкана Эбеко и холодного озера в кратере вулкана Богдановича. В результате воднобалансовых расчетов получены значения вулканического притока воды и/или пара, необходимого для существования горячих озер в условиях современного состояния вулкана.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Л.В. Котенко (ИВиС ДВО РАН) за участие во всех полевых работах в районе проведения исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках НИР ИВиС ДВО РАН (тема № FWEW-2019-0001: “Комплексное исследование крупных уникальных геотермальных систем, источники тепла и металлоносных флюидов”).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башарина Л.А., Храмова Г.Г.* Состояние вулкана Эбеко в 1966–1967 гг. // Бюлл. вулканол. станций. 1971. № 47. С. 44–51.
- Бернгард Р.П.* Горные волны как особо опасное аэрологическое явление над Курильскими островами // Курильские острова (природа, геология, землетрясения, вулканы, история, экономика) / Отв. ред. Т.К. Злобин, М.С. Высокова. Южно-Сахалинск: Сахалинское книжное изд-во, 2004. С. 152–156.
- Вакин Е.А., Сугробов В.М.* Гидрогеологические особенности вулканических структур и современные гидротермальные системы // Гидрогеология СССР: Камчатка, Курильские и Командорские острова. 1972. Т. XXIX. С. 169–196.

Власов Г.М. Особенности кратерно-озерных отложений // Бюлл. МОИП. 1960. Т. 35. № 6. С. 95–109.

Гавриленко Г.М. Гидрологическая модель кратерного озера вулкана Малый Семячик (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2000. № 6. С. 1–11.

Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.

Горшков Г.С. Действующие вулканы Курильской островной дуги // Тр. Лаборатории вулканологии. 1958. Вып. 13. С. 5–71.

Горшков Г.С. Каталог действующих вулканов Курильских островов // Бюлл. вулканол. станций. 1957. № 25. С. 96–178.

Дюнин А.К. Механика метелей. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963. 378 с.

Зеленов К.К., Ткаченко Р.П., Канакина М.Л. Перераспределение рудообразующих элементов в процессе гидротермальной деятельности влк. Эбеко (о. Парамушир) // Тр. ГИН АН СССР. 1965. Вып. 141. С. 140–167.

Иванов В.В. Современная гидротермальная деятельность вулкана Эбеко на острове Парамушир // Геохимия. 1957. № 1. С. 63–76.

Котенко Т.А., Калачева Е.Г. Гидрологический и гидрохимический режим кратерного озера вулкана Эбеко (1951–2020 гг.), о. Парамушир // Материалы XXIV региональной научной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 29–30 марта 2021 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 125–128.

Котенко Т.А., Котенко Л.В. Гидротермальные проявления и тепловой поток вулканов Эбеко и Крашенников (о. Парамушир, Курильские о-ва) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 1. С. 129–137.

Котенко Т.А., Котенко Л.В. Новое озеро в кратере Корбута вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. № 1. Вып. 53. С. 5–11.

<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-1-53-5-11>

Котенко Т.А., Котенко Л.В., Сандимирова Е.И. и др. Извержение вулкана Эбеко в январе–июне 2009 г. (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 1. Вып. 15. С. 56–68.

Котенко Т.А., Мельников Д.В., Тарасов К.В. Газовая эмиссия вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2003–2021 гг.: геохимия, потоки и индикаторы активности // Вулканология и сейсмология. 2022. № 4. С. 31–46.

<https://doi.org/10.31857/S0203030622040058>

Котенко Т.А., Смирнов С.З., Тимина Т.Ю. Активность вулкана Эбеко в 2022 г.: механизм и продукты

- извержения // Вулканология и сейсмология. 2023. № 4. С. 3–22.
<https://doi.org/10.31857/S0203030623700244>
- Лавров С.А. Влияние метеофакторов, свойств снега и климатических изменений на испарение с поверхности снежного покрова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 63–88.
https://doi.org/10.35567/19994508_2023_3_5
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Храмова Г.Г. Газо-гидротермальное извержение вулкана Эбеко в феврале–апреле 1967 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1969. № 45. С. 3–6.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Особенности химического и изотопного состава фумарольных газов в межэруптивный период деятельности вулкана Эбеко // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 21–36.
- Мусаелян Ш.А. Волны препятствий в атмосфере. Л.: ГИМИЗ, 1962. 144 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сахалинская область. СПб.: Гидрометеиздат, 1990. Сер. 3. Вып. 34. 351 с.
- Нехорошев А.С. Геотермические условия и тепловой поток вулкана Эбеко на о-ве Парамушир // Бюлл. вулканол. станций. 1960. № 29. С. 38–46.
- Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н.П. Лавров. М.: Наука, 2005. 604 с.
- Опыт комплексного исследования района современного и новейшего вулканизма (на примере хр. Вернадского, о. Парамушир) // Тр. СахКНИИ СО АН СССР / Отв. ред. С.И. Набоко. Южно-Сахалинск: Дальневосточное книжное изд-во, 1966. Вып. 16. 208 с.
- Постников А.Н. Испарение с поверхности снежного покрова за период его залегания на территории России // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 42. С. 55–63.
- Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Корнева И.А. Описание переноса и накопления снега в математической модели поверхностного баланса массы горного ледника. Часть I. Теория, базовые алгоритмы и тестирование // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 37. № 3. С. 70–78.
<https://doi.org/10.33075/2220-5861-2019-3-70-78>
- Сидоров С.С. Активизация вулкана Эбеко в 1963–1964 гг. и эволюция его гидротермальной деятельности в предшествующий период // Бюлл. вулканол. станций. 1966. № 40. С. 61–69.
- Скрипко К.А., Филькова Е.М., Храмова Г.Г. Состояние вулкана Эбеко летом 1965 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1966. № 42. С. 42–55.
- Сучков В.Е. Энергия оледенения ледников о. Парамушир (Курильские острова) // Материалы гляциологических исследований. 1999. Вып. 87. С. 196–201.
- Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 84 с.
- Храмова Г.Г. Влияние усиления активности вулкана Эбеко на состав вод озера Горячего // Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма. Новосибирск: Наука, 1974. С. 62–67.
- Храмова Г.Г. Кратерно-озерные отложения: динамика формирования (на примере вулкана Эбеко). Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. 136 с.
- Barry R.G. Mountain weather and climate. London: Cambridge University Press, 2008. 505 p.
- Belousov A., Belousova M., Auer A. et al. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles // Bull. Volcanol. 2021. V. 83. № 4.
<https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z>
- Bruinjtjes R.T., Clark T.L., Hall W.D. Interactions between topographic air-flow and cloud/precipitation development during the passage of a winter storm in Arizona // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51. P. 48–67.
- Harris A.J.L., Lodato L., Dehn J., Spampinato L. Thermal characterization of the Vulcano fumarole field // Bull. Volcanol. 2009. V. 71. P. 441–458.
<https://doi.org/10.1007/s00445-008-0236-8>
- Hirayama Y., Okawa A., Nakamachi K. et al. Estimation of water seepage rate in the active crater lake system of Kusatsu-Shirane volcano, Japan, using FDNPP derived radioactive cesium as a hydrological tracer // J. Environ. Radioact. 2020. V. 218. № 106257.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106257>
- Hochstein M.P., Bromley C.J. Steam cloud characteristics and heat output of fumaroles // Geothermics. 2001. V. 30. P. 547–559.
- Hurst T., Hashimoto T., Terada A. Crater Lake energy and mass balance // Volcanic Lakes / Eds D. Rouwet et al. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. P. 307–322.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2_3
- Minder J.M., Durran D.R., Roe G.H., Anders A.M. The climatology of small scale orographic precipitation over the Olympic mountains: Patterns and processes // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2008. V. 134(633). P. 817–839.
<https://doi.org/10.1002/qj.258>
- Pasternack G., Varekamp J.C. Volcanic Lake systematics, I. Physical constraints // Bull. Volcanol. 1997. V. 58. P. 528–538.
- Ryan P.J., Harleman D.R., Stolzenb K.D. Surface heat loss from cooling ponds // Water Resour. Res. 1974. V. 10. P. 930–938.

Terada A., Hashimoto T., Kagiya T. A water flow model underlying hydrothermal system // Bull. Volcanol. 2012. of the active crater lake at Aso volcano, Japan: fluctuations V. 74. P. 641–655. of magmatic gas and groundwater fluxes from the <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0550-4>

CRATER LAKES OF THE VERNADSKY RIDGE OF PARAMUSHIR ISLAND (KURIL ISLANDS): WATER BALANCE AND DYNAMICS

T. A. Kotenko

*Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia
e-mail: sinarka2017@mail.ru*

The paper considers the water balance of cold and hot crater lakes of the Vernadsky ridge on Paramushir Island. Precipitation was measured at the height of the craters to calculate the incoming part. A necessary condition for the existence of permanent cold crater lakes with precipitation of ~4660 mm per hydrological year is a catchment area of more than 60 thousand m². The evolution of lakes in the craters of the active Ebeko volcano is presented. The volcanic contribution (inflow of water and/or steam of volcanic origin) to thermal lakes in previous periods of time and in the current state of the volcano has been estimated. In the long term, the Middle Crater and the Korbut crater are suitable for the formation of hot lakes. Until the end of the current eruption in the Korbut crater, the formation of a lake in it is impossible. In the post-eruptive period, with an estimated crater diameter of 250 ± 50 m, a volcanic inflow of 8–13 kg/s will be sufficient for the equilibrium existence of a lake with a temperature of 35°C and a mirror area of 25 thousand m². Volcanic steam has been entering the lake in the Middle Crater since 2017, but the lake remains cold. The volcanic inflow should be 5 ± 2 kg/s in order to achieve a balance equilibrium for a lake with a temperature of 35°C and a mirror area of 25 thousand m².

Keywords: Ebeko volcano, crater, lake, water balance, volcanic inflow, orographic precipitation's component

УДК 551.508.856, 535.361.22, 550.343.64

АНАЛИЗ ВАРИАЦИИ СИГНАЛА АЭРОЗОЛЬНОГО ЛИДАРА КАК ВОЗМОЖНОГО ИНДИКАТОРА ЛОКАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

© 2025 г. А. В. Мясников^{а, *}, А. Л. Собисевич^б, С. М. Першин^{с, **},
М. Я. Гришин^с, В. Н. Леднёв^с, В. А. Завозин^с

^аГосударственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ,
Университетский просп., 13, Москва, 119234 Россия

^бИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^сИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Россия

*e-mail: andrey0405@mail.ru

**e-mail: pershin@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 24.11.2023 г.

После доработки 26.09.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

Проведен кросс-спектральный анализ результатов почти годового лидарного мониторинга выделения аэрозолей из коры Земли в тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) Института ядерных исследований РАН. Установлено, что ~40% энергии сигнала лидара определяются вариацией метеорологических факторов — атмосферного давления (эффект “барометрической откачки”) и влажности. Существенно, что в модуляции сигнала присутствуют составляющие деформации коры лунно-солнечными приливными волнами M2 и O1. Статистически обоснована перспективность лидара как нового инструмента мониторинга локальной сейсмической активности по вариациям корового аэрозоля.

Ключевые слова: лидар, коровый аэрозоль, кросс-спектральный анализ, метеорологические факторы, лунно-солнечный прилив

DOI: 10.31857/S0203030625010047, EDN: GISEPQ

ВВЕДЕНИЕ

Идея использования лидарного мониторинга активности выделения коровых флюидов Земли для прогноза сейсмической активности вполне очевидна. Согласно теории упругой отдачи, в районе формирующего сейсмического очага возникают зоны растяжения и сжатия, что вызывает напряжение и деформацию коры Земли. Это, в свою очередь, приводит к изменению выхода аэрозолей всех типов, которые выносятся газы по щелям и порам породы. Так, напряженное состояние приводит к изменению проницаемости среды, а также порового давления в результате деформации вмещающей среды. При этом активизируются процессы перехода

газа в свободное состояние, если он был связан в кристаллических решетках или растворен в жидкости [Добровольский, 2011]. Согласно работе [Добровольский, 2009], максимальный радиус регистрации возможных сейсмических событий относительно станции наблюдения при условии деформационных сдвигов определяется выражением $\lg(R) = 0.43 \cdot M$, где R — расстояние до эпицентра (км), M — магнитуда. Так, например, для землетрясения в Турции 06.02.2023 с магнитудой $M = 7.8$ радиус (R) проявления деформационных сдвигов [Добровольский, 2009] достигал величины 2512 км.

Методы измерения активности флюидов охватывают широкий диапазон от оптико-электронных

средств мониторинга вариаций содержания аэрозолей, а именно компактных лидаров нового поколения на базе диодных лазеров с безопасным уровнем излучения [Першин и др., 2021], до регистрации альфа-распада радиоактивного радона [Алексеев и др., 2009]. Но тем не менее ни один из этих методов не защищен от влияния метеорологических вариаций на результаты измерений [Myasnikov et al., 2022]. Поскольку лидар в этом ряду — сравнительно новый инструмент, который был предложен нами ранее [Першин и др., 2021] для мониторинга сейсмической активности в районе вулкана Эльбрус, оставалась неясной величина вклада вариации метеорологических факторов и деформационной составляющей в лидарный сигнал мониторинга аэрозолей в тоннеле БНО.

Цель работы — анализ лидарных данных, которые собирались на протяжении почти годового непрерывного наблюдения, а также статистическое обоснование применимости лидара в качестве мониторинга сейсмической активности по динамике выхода аэрозолей из коры Земли. Особое внимание привлекала возможность регистрации статистически значимых отклонений сигнала лидара от средних значений вариаций аэрозолей для поиска предвестников катастрофических событий.

ИНСТРУМЕНТЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

Станция наблюдения размещена в тупиковом тоннеле во вспомогательной штольне Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) Института ядерных исследований РАН (Кабардино-Балкарская Республика, село Нейтрино) с координатами $43^{\circ}14'57.7''$ N, $42^{\circ}43'19.5''$ E. Две параллельные штольни длиной более 4 км, разделенные 50-метровым отрезком, были вырублены в скальной породе под горой Андырчи на высоте 1715 м над уровнем моря для размещения двух нейтринных телескопов. Тупиковый тоннель длиной 50 м расположен относительно входного портала БНО на расстоянии 3800 м и в 24 км от восточной вершины вулкана Эльбрус.

В состав приборной группы входят аэрозольный лидар на базе диодного лазера с измерительной базой 30 м [Першин и др., 2021] и метеостанция. Метеостанция содержит датчик

атмосферного давления, термометр и гигрометр для измерения влажности. Расположение станции вне контура активной вентиляции штольни обеспечивает высокую стабильность температуры (суточная вариация не превышает 0.05°C), что позволило исключить температуру из метеорологических факторов, влияющих на измерения. Большое удаление тоннеля от входа БНО снижает влияние вариации внешних условий на данные лидарного зондирования.

Уникальный лидар, не имеющий отечественных аналогов, был разработан группой исследователей [Першин и др., 2021] для зондирования среды обитания с безопасным для глаз уровнем излучения (~ 1 мкДж/см²). Лидар способен обнаруживать шлейфы выхода аэрозолей, визуально невидимых, из щелей и трещин в скалах тоннеля и одновременно измерять расстояние до них. Предполагалось, что при сейсмических событиях вдоль трассы зондирования могут появляться трещины в породе, из которых будут выходить тектонические газы, несущие аэрозоли. Для локализации их положения и последующего отбора проб для анализа необходимо измерение дальности по трассе. Другим преимуществом повышения чувствительности лидара к вариациям аэрозолей является интегрирование сигнала рассеяния вдоль трассы.

Лидар работал в автономном режиме без участия оператора с сохранением данных на удаленном компьютере в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФ РАН, Москва) в реальном времени. Для оперативного анализа данные отображались на настенном мониторе в лаборатории ИОФ РАН.

На рис. 1 (верхняя панель) представлен график вариации лидарного сигнала рассеяния на аэрозолях, взвешенных в воздухе тоннеля, и его спектр мощности (нижняя панель) на выборке, включающей данные за период с 23.08.2019 г. по 12.06.2020 г. Это непрерывный 10-месячный мониторинг аэрозоля с периодом зондирования 10 мин. Параллельно с этими измерениями были сделаны записи вариации метеорологических параметров.

Для последующего анализа динамики аэрозолей были использованы данные прецизионного 75-метрового лазерного интерферометра-деформографа [Милюков и др., 2005]

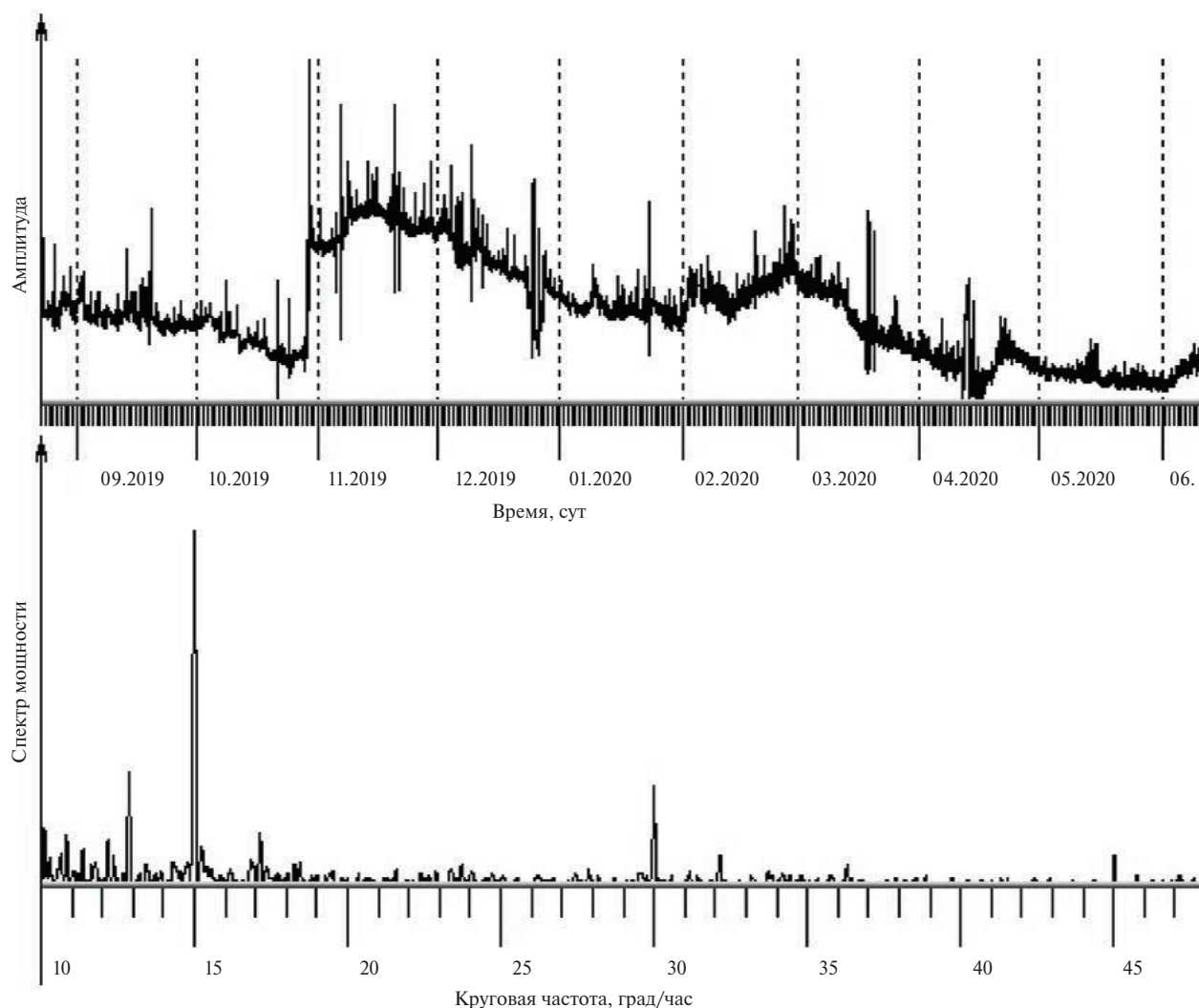


Рис. 1. Вариации сигнала аэрозольного лидара в период 23.08.2019–12.06.2020 (верхняя панель) и спектр мощности лидарного сигнала (нижняя панель) в частотном диапазоне, соответствующем периоду 36–7.5 ч.

Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ). Деформограф был собран по схеме интерферометра Майкельсона и размещен в главной штольне БНО (700 м от входного портала). Деформограф регистрировал приливные волны [Мясников, 2021; Мясников и др., 2022] и волны Лява и Релея после землетрясения, а также ряд других процессов по сжатию – растяжению коры Земли в абсолютных единицах, что было весьма важным фактором сравнения (репером) с данными лидара при анализе.

Здесь следует отметить, что недавно специалисты Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН впервые с помощью уникального прецизионного термометра собственной разработки

зарегистрировали приливные волны земной коры в тупиковом тоннеле БНО [Лиходеев и др., 2022]. В этой работе была измерена модуляция конвекционных тепловых потоков в скальной породе, что указывает на наличие мощного источника тепла под тоннелем. Кроме того, эти данные были подтверждены благодаря развитию систем прецизионных наклономерных наблюдений [Гравиров и др., 2022]. Таким источником может быть очаг вулкана Эльбрус [Уткин и др., 2009], расположенный с небольшим смещением от кратера в сторону БНО.

КРОСС-СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В настоящей работе проведен спектральный и кросс-спектральный анализ данных сигнала аэрозольного лидара, атмосферного давления,

влажности и деформации коры Земли в частотном диапазоне, соответствующем периодам 36–7.5 ч. Данный частотный диапазон включает все основные природные циклические изменения метеорологических параметров, а также суточные и полусуточные диапазоны лунно-солнечного прилива. Из графика спектра мощности (см. рис. 1, нижняя панель) видно, что в узких частотных диапазонах существуют весьма заметные выбросы над уровнем средней амплитуды мощности сигнала.

На рис. 2 показан результат кросс-спектрального анализа (кросс-амплитуда) сигнала лидара с метеорологическими параметрами. На панели А показан график спектральной плотности вариаций сигнала лидара. Цифрами пронумерованы наиболее интенсивные моды в спектре. Периоды и фазовые сдвиги на соответствующих периодах этих мод сведены в табл. 1. На панели В1 показан соответствующий спектр атмосферного давления, на панели В2 — результат кросс-спектрального анализа давления с вариацией аэрозоля. Как видно из графика В2 (см. рис. 2), вариация давления сказывается на суточном, полусуточном и третьсуточном циклах сигнала лидара. Основная суточная волна давления, как показал кросс-спектральный анализ, находится в противофазе с сигналом лидара (см. табл. 1, третья строка). При этом минимум давления наступает на раньше максимума интенсивности выделения аэрозоля на 37.1 мин ($682.9 - 720 = 37.1$ мин, где 720 мин — разница между максимумом и минимумом для суточного цикла). Влияние атмосферного давления на активность выделения коровых газов хорошо известно (эффект “барометрической откачки” [Edwards, Bates, 1980; Стенькин и др., 2017]). Природа циклов атмосферного давления очевидна: основной суточный цикл 24 ч связан с Солнцем, отсюда появление кратных волн с периодами 12 и 8 ч.

Вариация влажности, как показал кросс-спектральный анализ, имеет 6 общих циклов с вариацией уровня аэрозоля (см. рис. 2). При этом все фазы этих мод влажности отстают примерно на 2 ч от соответствующих циклов аэрозоля. Здесь природа циклов влажности сложнее, чем для давления. Кроме суточной волны вариации влажности и кратных ей периодов существуют моды с периодами 28, 21 и

11, 2 мин, которые на частотной оси (град/час) расположены симметрично относительно этих основных волн. Природа этих циклов такова, что амплитуды вариации суточной и полусуточной волны влажности модулированы семисуточным циклом. Действительно, в случае суточной волны получаем для правой боковой линии спектра $28 \cdot 24 / (28 - 24) = 168$ ч; такой же результат получаем для левой линии: $21 \cdot 21 / (24 - 21) = 168$ ч. Или для полусуточной волны имеем $12 \cdot 11.2 / (12 - 11.2) = 168$ ч. Отсюда можно предположить, что для полусуточного цикла должна существовать и левая боковая мода с периодом 12.92 ч.

Особый интерес вызывает тектоническая составляющая вариации аэрозолей, которые выносят газы по трещинам коры. Как уже указывалось выше, объемная активность выделения флюидов должна коррелировать с деформацией коры Земли. Наиболее простой и надежный способ проверить данный факт — это сопоставить сигнал лидара и деформацию коры в приливном диапазоне по данным деформографа. Это тот же самый диапазон 36–7.5 ч, в который попадают все основные волны суточного и полусуточного периодов лунно-солнечного прилива [Мельхиор, 1968].

Согласно работе [Мельхиор, 1968], максимальное выделение флюидов будет происходить в момент наименьшего прилива — в процессе сжатия коры, и наоборот, минимум уровня флюидов будет приходиться на максимальный прилив. Деформационные данные, которые были использованы при обработке, получены с помощью большебазового лазерного интерферометра-деформографа ГАИШ МГУ [Милюков и др., 2005].

На рис. 3 приведены результаты спектрального и кросс-спектрального анализов сигнала лидара с приливной деформацией земной коры. На графике спектральной плотности сигнала лидара (см. рис. 3, верхняя панель), как уже отмечалось выше, присутствуют суточные и полусуточные циклы. Формально в частотном диапазоне эти циклы полностью совпадают с суточной и полусуточной солнечными волнами. Поэтому эти циклы на графике условно обозначены символами S1 (24 ч) и S2 (12 ч), принятыми в теории земных приливов. При этом солнечная приливная волна S1

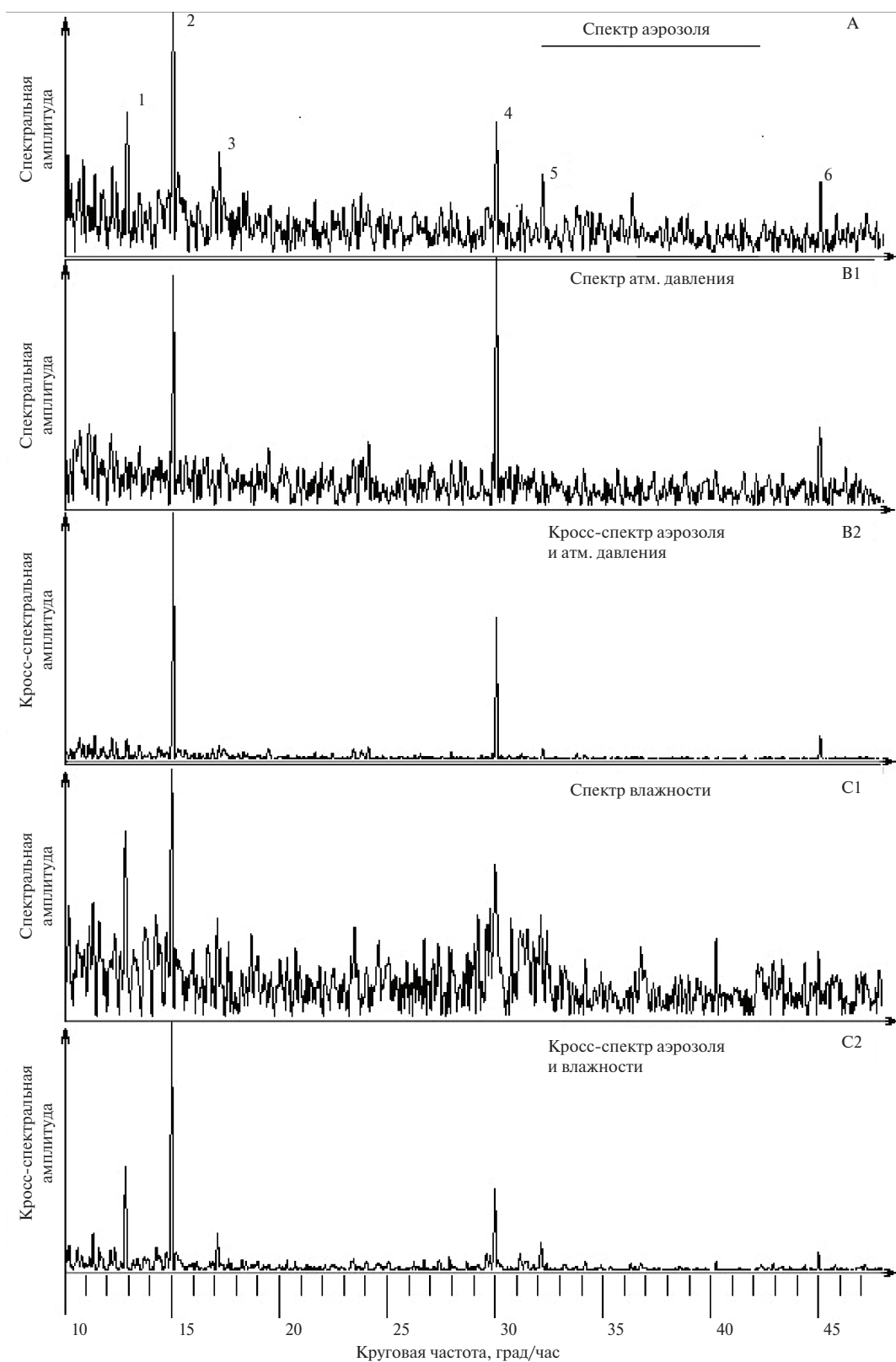


Рис. 2. Спектральная плотность вариации сигнала аэрозольного лидара, цифрами 1–6 маркированы основные моды спектра (панель А); спектральная плотность вариации атмосферного давления и кросс-спектр аэрозолей и давления соответственно (панели В1 и В2); спектральная плотность вариации влажности и кросс-спектр аэрозолей и влажности соответственно (панели С1 и С2).

Таблица 1. Основные моды вариации активности выделения аэрозоля и фазовый сдвиг с вариацией метеорологических параметров

№ моды (см. рис. 2, панель А)	1	2	3	4	5	6
Период, ч	28.0	24.0	21.0	12.0	11.2	8.0
Круговая частота, град. час	12.857	15	17.142	30	32.143	45
Атмосферное давление (инверсия), фазовый сдвиг, мин	Нет влияния	682.9 (–37.1)	Нет влияния	496.2 (+136.3)	Нет влияния	–97.8 (+142.2)
Влажность, фазовый сдвиг, мин	+132.0	+126.5	+143.4	+95.9	+123.0	+25.8

Примечание. Вторая строка показывает период и соответствующую круговую частоту. В скобках для давления показан фазовый сдвиг между минимумом давления и максимумом уровня аэрозоля.

является практически полностью вырожденной и на спектре деформации видна в результате влияния на лазерный интерферометр суточной температуры [Мясников, 2019]. Таким образом, эти волны, совпадающие с основными циклами вариации метеорологических параметров, не имеют отношения к приливной деформации. Но результат кросс-спектрального анализа показал наличие в сигнале вариации аэрозолей лунных компонент прилива — это волны Q1 (26.8683 ч), O1 (25.8193 ч), M2 (12.4106 ч), которые не совпадают в частотном диапазоне ни с какими циклами колебаний метеопараметров и отражают только деформацию коры Земли.

Отметим, что среди вариаций лидарного сигнала (см. рис. 1, верхняя панель) отдельный интерес вызывают две сингулярности: трехкратное скачкообразное увеличение выхода аэрозолей 28.10.2019 г. в 23:19 UTC (02:19 по московскому времени), а также аномально большой (по сравнению с другими) выход аэрозолей 29.10.2019 г. в 08:33 UTC (11:33 по московскому времени). Недавно было выявлено, что большой выход аэрозолей 29.10.2023 г. синхронизован с расширением коры Земли по данным деформографа, повышением температуры и влажности внутри тупикового туннеля, а также с увеличением наклона наклономера [Першин и др., 2023]. Корреляция набора сигналов разных инструментов и датчиков указывает на сейсмическую природу сигнала лидара. Напротив, природа скачкообразного увеличения выхода аэрозолей до конца остается неясной, поскольку в данных

других приборов не было зарегистрировано подобных скачков.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для решения вопроса о влиянии метеорологических факторов на сигнал лидара был выбран узкий частотный диапазон, соответствующий периоду 36–7.5 ч. Этот диапазон содержит различные периоды вариаций атмосферного давления, влажности и температуры на фоне лунно-солнечного прилива, в том числе основной для нас — суточный диапазон. Для этой работы были использованы записи непосредственных измерений всех этих параметров. Высокая стабильность суточной температуры (что было достигнуто за счет удаленности установки от активного контура вентиляции), позволила исключить этот параметр (суточная вариация не превышает 0.05°C).

Исследование влияния различных факторов на сигнал проводилось с помощью кросс-спектрального анализа, основные результаты которого приведены в табл. 1. Так, было выявлено, наряду с суточной вариацией, шесть основных циклов вариации лидарного сигнала аэрозолей в диапазоне 36–7.5 ч. Оценка показала, что около 41% мощности вариации экспериментального ряда сигнала лидара в этом диапазоне приходится на эти циклы, суммарная ширина которых составляет менее 5% общего частотного диапазона.

Атмосферное давление. Влияние вариации атмосферного давления на выход аэрозолей из коры — вполне ожидаемый результат. Амплитудный кросс-спектральный анализ показал

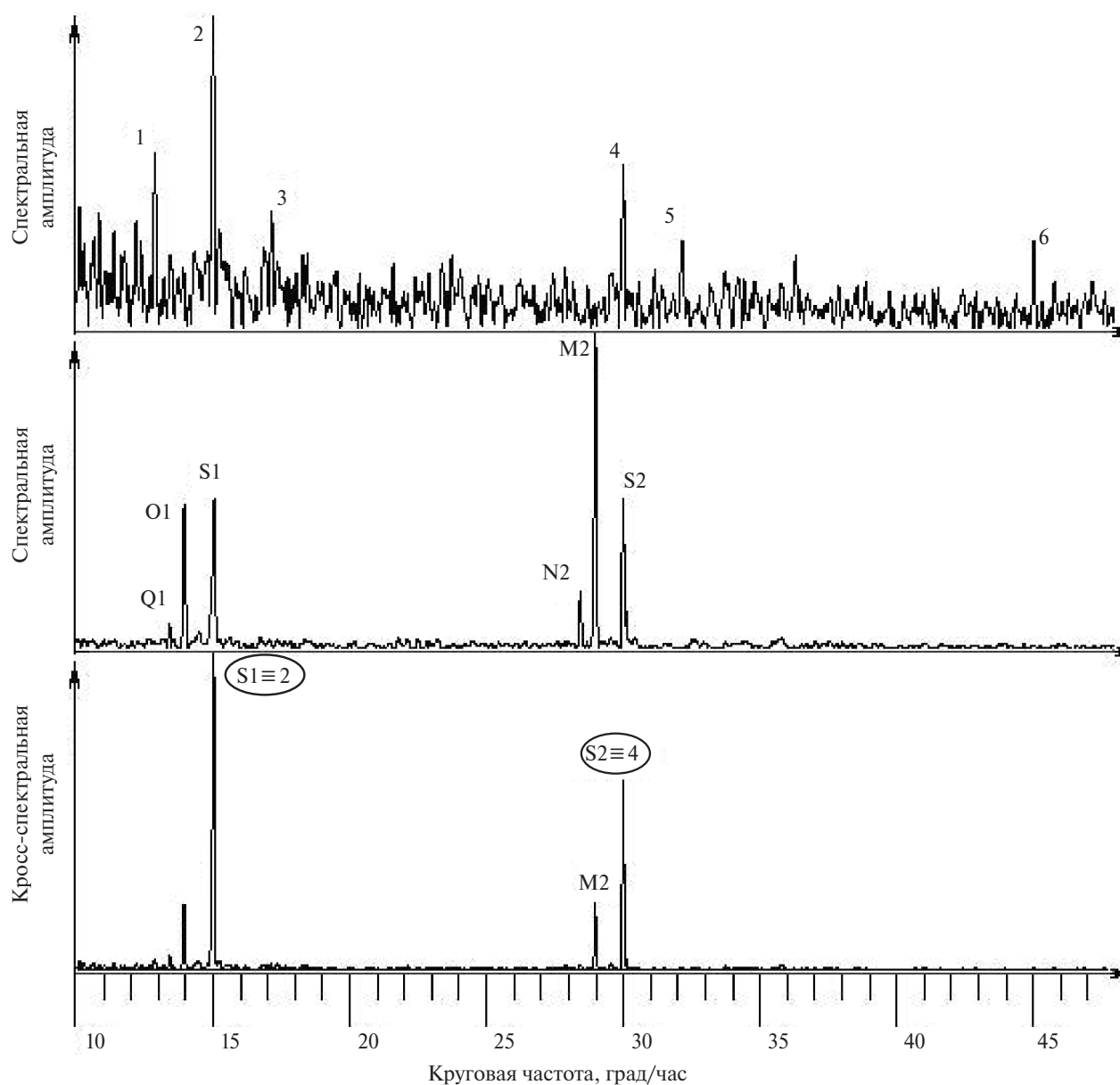


Рис. 3. Спектральная плотность вариации сигнала аэрозольного лидара (верхняя панель); спектральная плотность деформации коры Земли (средняя панель); кросс-спектральный анализ сигнала лидара и приливной деформации коры (нижняя панель). Вертикальными линиями с обозначениями нанесены лунные и солнечные составляющие прилива согласно работе [Мельхиор, 1968].

полное совпадение на суточном, полусуточном и третьсуточном диапазонах вариации давления и аэрозолей. Показано (см. рис. 2, панели B1, B2), что суточный цикл является основным циклом вариации, остальные моды в спектре — это кратные моды в спектральном разложении, что указывает на непериодический характер суточной вариации. Фазовый кросс-спектральный анализ позволил определить отставание максимальной активности выделения радона от минимума атмосферного давления для

суточного хода волны на 31 мин. То есть максимальный уровень выделения радона приходится на минимальный уровень атмосферного давления и наоборот. Это известный, так называемый запирающий эффект влияния атмосферного давления на уровень коровых газов [Edwards, Bates, 1980; Стенькин и др., 2017].

Влажность. Неожиданным оказался результат кросс-спектрального анализа вариации влажности и сигнала аэрозоля (см. рис. 2, панели C1, C2). Все шесть циклов в спектральной

плотности сигнала лидара в данном частотном диапазоне однозначно определяются вариацией уровня влажности в месте установки. Моды 1, 3 и 5 являются боковыми модами (деклинационные волны, согласно терминологии, принятой в теории лунно-солнечных приливов [Мельхиор, 1968]) и характеризуют модуляцию основных волн (суточной и полусуточной) с периодом ровно 168 часов (см. выше) или 7 суток. Природных циклов с таким периодом не существует, близко только продолжительность одной фазы луны — 7.38 суток. С другой стороны, 7 суток — это продолжительность цикла производственной недели. Скорее всего, этот цикл связан с тем, что в течение рабочей недели дважды в день происходит заезд/выезд электровоза в главный тоннель БНО для смены дежурных сотрудников обсерватории, что сопровождается открыванием входных ворот, тогда как по воскресным дням заезд/выезд электровоза происходит однократно. Возможно также влияние различных режимов работы активной вентиляции в будни и выходные дни.

Лунно-солнечный прилив. Важным также является результат кросс-спектрального анализа вариации сигнала лидара и приливной деформационной составляющей. Особый интерес представляют именно лунные составляющие прилива. Так, были выделены две лунные приливные волны M2 и Q1, которые, в отличие от солнечных, не имеют общих периодов с вариацией метеорологических параметров. Наличие этих составляющих показывает, что уровень сигнала лидара может иметь и “тектоническую” составляющую, т.е. нести информацию о напряженно-деформированном состоянии коры Земли.

ВЫВОДЫ

Фазовый анализ показал, что соответствующие циклы колебаний сигнала аэрозольного лидара и влажности сдвинуты примерно на 2 часа. То есть сигнал лидара опережает по фазе влажность для этих периодов. Следовательно, лидар регистрирует изменение влажности по аэрозолям (появление тумана). Другими словами, вариация влажности не влияет на уровень выхода корового аэрозоля.

Статистически обосновано наличие тектонической составляющей в лидарном сигнале, что подтверждает гипотезу зависимости вариаций лидарного сигнала от интенсивности выделения объемного флюида при деформационных подвижках коры Земли. Отсюда следует, что подобный подход может оказаться более чувствительным к уровню напряжения коры в период подготовки сейсмического события, чем деформационные методы.

Особый интерес здесь вызывают вариации концентрации аэроионов (выход заряженных частиц из коры Земли) как центров конденсации паров воды (формирование аэрозолей). Известно [Warden et al., 2019], что мониторинг концентрации аэроионов является новым направлением поиска предвестников землетрясений при условии размещения большого количества датчиков в регионах тектонических разломов. Здесь лидар имеет важное преимущество — интегрирование сигнала рассеяния на трассах зондирования большой длины по сравнению с точечным детектированием ионов в месте размещения датчика.

Таким образом, проведенный анализ показал, что компактный аэрозольный лидар на базе диодного лазера с безопасным для глаз уровнем излучения (~ 1 мкДж/см²) может быть рассмотрен как новый инструмент для мониторинга сейсмических процессов. Размещение такого прибора в инструментальном комплексе по мониторингу сейсмической активности, несомненно, повысит вероятность регистрации событий различной природы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку исследований (проект РНФ № 19-19-00712).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев В.В., Гаврилюк Ю.М., Громушкин Д.М. и др. Связь вариаций потока тепловых нейтронов из

- земной коры с лунными периодами и сейсмической активностью // *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 91–100.
- Гравиров В.В., Дещеревский А.В., Кузьмин Ю.О., Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Широков И.А.* Развитие систем прецизионных наклономерных наблюдений в условиях подземной обсерватории // *Сейсмические приборы*. 2022. Т. 58. № 1. С. 29–52.
- Добровольский И.П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009. 236 с.
- Добровольский И.П.* Возмущения флюидного потока земли при подготовке тектонического землетрясения // *Геофизические исследования*. 2011. Т. 12. № 2. С. 33–47.
- Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Гравиров В.В.* Приливные эффекты в тонкой структуре тепловых полей по результатам наблюдений в глубокой штольне северокавказской геофизической обсерватории // *Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 503. № 2. С. 148–153.
- Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
- Милуков В.К., Клячко Б.С., Мясников А.В., Стриганов П.С., Янин А.Ф., Власов А.Н.* Лазерный интерферометр-деформограф для мониторинга движений земной коры // *Приборы и техника эксперимента*. 2005. № 6. С. 87–103.
- Мясников А.В.* О проблеме учета влияния метеорологических факторов на большие прецизионные системы на примере Баксанского большебазового лазерного интерферометра // *Сейсмические приборы*. 2019. Т. 55. № 2. С. 27–38.
- Мясников А.В.* Приливной отклик геофизической среды как индикатор уровня сейсмического напряжения земной коры // *Сейсмические приборы*. 2021. Т. 57. № 4. С. 51–65.
- Мясников А.В., Собисевич А.Л., Лиходеев Д.В.* Региональный отклик геофизической среды на приливное воздействие // *Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 503. № 2. С. 154–160.
- Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А. и др.* Диодный лазер, генерирующий импульсы длительностью 3 нс, для лидара с высоким пространственным разрешением // *Квантовая электроника*. 2021. Т. 51. № 5. С. 423–426.
- Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А. и др.* Лидарный мониторинг магматической активности малой камеры эльбурского вулканического центра // *Доклады Российской Академии наук. Физика, технические науки*. 2023. Т. 509. С. 15–20.
- Собисевич А.Л., Гриднев Д.Г., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х.* Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // *Сейсмические приборы*. 2008. Т. 14. № 1. С. 21–42.
- Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Громушкин Д.М., Сулаков В.П., Щеголев О.Б.* Подземная физика и эффект влияния барометрического давления на подземный фоновый поток тепловых нейтронов // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2017. Т. 151. № 5. С. 845–849.
- Уткин И.С., Федотов С.А., Уткина Л.И.* Оценка тепла, накопленного магматическим очагом вулкана Эльбрус во вмещающих его породах, и возможности его извлечения // *Вулканология и сейсмология*. 2009. № 5. С. 3–23.
- Edwards J.C., Bates R.C.* Theoretical evaluation of radon emanation under a variety of conditions // *Health Phys.* 1980. V. 39. № 2. P. 263–274.
- Myasnikov A.V., Pershin S.M., Grishin M.Ya., Zavozin V.A., Makarov V.S., Ushakov A.A.* Estimation of the Influence of Meteorological Factors on the Aerosol Lidar Signal in Tunnels above the Elbrus Volcano Chamber // *Phys. Wave Phenom.* 2022. V. 30. № 2. P. 119–127.
- Warden S., Bleier T., Kappler K.* Long term air ion monitoring in search of pre-earthquake signals // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 2019. V. 186. P. 47–60.

ANALYZING AEROSOL LIDAR SIGNAL VARIATION AS A POSSIBLE LOCAL SEISMIC ACTIVITY INDICATOR

**A. V. Myasnikov^{1, *}, A. L. Sobisevich², S. M. Pershin^{3, **},
M. Ya. Grishin³, V. N. Lednev³, V. A. Zavozin³**

*¹Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University,
Universitetsky prosp., 13, Moscow, 119234 Russia*

*²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

*³Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Vavilova str., 38, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: andrey0405@mail.ru*

***e-mail: pershin@kapella.gpi.ru*

We report the results of an almost year-long lidar monitoring of crustal aerosol emanation in a tunnel of the Baksan Neutrino Observatory of the Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences (BNO INR) located in the Neutrino village in Kabardino-Balkaria. Cross-spectra analysis has demonstrated that at least 40% of the lidar signal energy is defined by meteorological parameter variations, namely, atmospheric pressure (represented in the barometric pumping effect) and air humidity. We demonstrate that lunar components of lunar-solar tides are present in the lidar signal (M2 and O1 waves) and these components do not coincide with meteorological parameter variation periods. This fact signifies that there is a tectonic component in the lidar-measured crustal aerosol variation signal. The totality of data shows the prospects of using lidar crustal aerosol monitoring for assessing local seismic activity level.

Keywords: lidar, crustal aerosol, cross-spectrum, meteorological parameters, lunar-solar tides

УДК 550.343.6

О ПРОЯВЛЕННОСТИ ТИПОВЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВЫХ АНОМАЛИЙ В ФОРШОКОВЫХ ОБЛАСТЯХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, КУРИЛО-КАМЧАТСКИЙ РЕГИОН

© 2025 г. М. В. Родкин^{a, b, c, *}, М. Ю. Андреева^b

^aИнститут теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия

^bИнститут морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН,
ул. Науки, 1Б, Южно-Сахалинск, 693022 Россия

^cИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

*e-mail: rodkin@mitp.ru

Поступила в редакцию 06.08.2024 г.

После доработки 21.10.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

Обсуждается перспективность нового алгоритма прогноза землетрясений, где за основу берется набор предвестниковых аномалий, ранее надежно выявленных в результате построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения. Принимается во внимание различие физических механизмов разноглубинных землетрясений. По данным регионального каталога Камчатки и Северных Курил КФ ФИЦ ЕГС РАН рассматривается вопрос, насколько часто такие типовые усредненные аномалии статистически надежно выявляются в форшоковых областях отдельных сильных землетрясений. Для этого каталога по крайней мере одна типовая аномалия выявляется в трети случаев целевых землетрясений магнитудой $M \geq 6.5$. Вероятность успешного ретроспективного прогноза в решающей степени зависит от числа событий, зарегистрированных в форшоковой области данного сильного землетрясения. Рост доли ретроспективно прогнозируемых землетрясений с ростом числа событий в форшоковой области данного сильного землетрясения подкрепляется результатами анализа мировых каталогов ISC-GEM и GCMT и дублета Турецких землетрясений 2023 г. Предлагаются варианты развития метода прогноза, обращается внимание на проблему ложных тревог.

Ключевые слова: прогноз землетрясений, типовые прогнозные аномалии, физика сейсмического разрушения, Курило-Камчатский регион

DOI: 10.31857/S0203030625010053, EDN: GIQKQG

ВВЕДЕНИЕ

Актуальными задачами геофизики являются как решение дилеммы принципиальной возможности или невозможности успешного прогноза землетрясений, так и развитие методов прогноза. Широко известно предположение о принципиальной невозможности прогноза землетрясений [Geller et al., 1997]. Проверка в реальном времени показала, однако, что по сравнению со случайным угадыванием наиболее удачные методики прогноза

дают намного лучшие результаты, хотя и лишь отчасти удовлетворяющие практическим требованиям [Кособоков, Соловьев, 2015; Ismail-Zadeh, Kossobokov, 2020], т.е. принципиальная возможность прогноза может полагаться доказанной. Основными препятствиями на пути получения эффективного прогноза [Соболев, 1993; Kagan, Jackson, 2000; Соболев, Пономарев, 2003; Завьялов, 2006; Jordan et al., 2011] считаются как чрезвычайно сильная фоновая изменчивость сейсмического режима, затрудняющая своевременное выявление прогнозных

признаков (часто, однако, выявляемых апостериори), так и отсутствие достаточно развитой физической модели сейсмического процесса. Однако общепринято, что физические механизмы разноточинных землетрясений различаются [Касахара, 1985; Калинин и др., 1989; Родкин и др., 2009]. Последнее обстоятельство важно и тем, что прогнозные признаки землетрясений, различающихся своим физическим механизмом, также могут различаться.

В последнее время по вопросам выявления и уточнения характера прогнозных аномалий и по пониманию различия физических механизмов разноточинных землетрясений были получены новые результаты. Статистически несомненные и хорошо параметризуемые средние прогнозные аномалии были получены в результате построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ), получаемой путем масштабированного суммирования данных по большому числу сильных землетрясений [Родкин, 2008; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, 2020]. При использовании мировых каталогов число сильных землетрясений, суммируемых при построении ООСЗ, составляет несколько сотен, до 1000 событий. При использовании региональных каталогов число таких землетрясений много меньше, соответственно, результаты построения ООСЗ по региональным данным более зашумленные [Родкин и др., 2020].

Подтвердились и гипотезы о различии физических механизмов разноточинных землетрясений. В работах [Rodkin, 2022; Родкин, Липеровская, 2023] было продемонстрировано различие ряда параметров и прогнозных эффектов разноточинных землетрясений, при этом характер этих различий отвечает ожидаемым изменениям физических механизмов разрушения в очагах разноточинных землетрясений [Bridgman, 1945; Калинин и др., 1989; Родкин и др., 2009; Houston, 2015; Родкин, Рундквист, 2017].

Для наиболее распространенного вида каталогов землетрясений (когда известны положение гипоцентра, время и магнитуда события) в ООСЗ наблюдаются 2 или 3 аномалии. Первая аномалия отвечает степенному росту интенсивности потока форшоков, вторая — уменьшению наклона графика повторяемости b -value, удобно

оцениваемому методом максимального правдоподобия по известной формуле [Aki, 1965]

$$b = \lg(e) / (\text{mean}(M) - M_c), \quad (1)$$

где $\text{mean}(M)$ — среднее значение магнитуд землетрясений, превышающих уровень достоверной регистрации M_c . Как видно из соотношения (1), величина наклона графика повторяемости изменяется в противофазе с изменениями средней магнитуды землетрясений $M \geq M_c$; можно рассматривать любую из этих характеристик. Ниже используется величина средней магнитуды.

Заметим, что на качественном уровне две вышеупомянутые аномалии являются фактически тавтологиями. Действительно, первая аномалия на качественном уровне может быть сформулирована так: предвестником сильного землетрясения является рост числа землетрясений, а вторая так: предвестником события большой магнитуды является увеличение средней магнитуды землетрясений. Эти аномалии получают нетривиальное наполнение, если используется параметризация, детализирующая характер аномалий. Метод построения и анализа ООСЗ позволяет получить наиболее робастную и точную их параметризацию. Обе отмеченные аномалии хорошо известны и часто используются в алгоритмах прогноза землетрясений.

В качестве третьей типовой аномалии используется тенденция изменения средней глубины форшоков. На тенденцию изменения глубины событий в форшоковой и афтершоковой областях также уже обращалось внимание (например, в работах [Погожин, 2009; Rodkin, Mandal, 2012]), но эта аномалия оставалась гипотетической, и при прогнозе она используется крайне редко. Заметим, что данная аномалия уже указывает на определенную физику процесса сейсмического разрушения. В том (более распространенном) случае, когда имеет место тенденция к уменьшению глубины событий и смещение по глубине не превышает пары десятков километров, наиболее естественно связать такие изменения с прорывами вверх легкого флюида.

Возникает вопрос о возможности использования выявленных в обобщенной окрестности

аномалий не только для исследования физики землетрясений, как это было сделано ранее [Родкин, 2008, 2020; Rodkin, Tikhonov, 2016; Rodkin, 2020], но и в целях прогнозирования. Преимуществом такого подхода представляется возможность использования наиболее полной и точной параметризации предвестниковых аномалий. В частности, при анализе ООЗС было показано, что средняя интенсивность потока форшоков n нарастает в обобщенной окрестности к моменту обобщенного сильного землетрясения (ОСЗ) по степенному закону согласно уравнению

$$\lg(n) = a + b \lg(\Delta t), \quad (2)$$

где Δt — время до момента ОСЗ. Амплитуды A аномалий величин наклона графика повторяемости (что эквивалентно изменениям среднего значения магнитуд $M \geq M_c$) и средней глубины форшоков нарастают по мере приближения момента обобщенного главного события согласно уравнению

$$A = a + b \lg(\Delta t). \quad (3)$$

В уравнениях (2) и (3) $\{a, b\}$ — подлежащие определению коэффициенты, различающиеся для разных видов аномалий и требующие уточнения для конкретного региона и каталога. При этом было показано [Rodkin, Tikhonov, 2016], что для ООЗС значения коэффициентов $\{a, b\}$ могут быть оценены с вполне удовлетворительной точностью.

Время начала развития аномалий вида (2) и (3), когда график изменения амплитуды ООЗС пересекается с фоновым уровнем, близко для всех трех аномалий и отстоит примерно на 100 дней от момента ОСЗ.

Ниже, по данным каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН [Catalog ..., 2023] для Камчатки и Северных Курил рассматривается результативность использования ООЗС для выявления предвестниковых аномалий в форшоковых областях отдельных сильных землетрясений. Результаты сравниваются с результатами аналогичного анализа по данным мировых каталогов ISC-GEM и GCMT [Родкин, 2023] и для дублета сильных Турецких землетрясений 2023 г. [Родкин и др., 2023].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Результатом построения и анализа обобщенной окрестности сильных ($M \geq 6.5$) землетрясений [Родкин и др., 2020] для регионального каталога Курильских островов стало ожидаемое соответствие с результатами анализа мировых данных для зон субдукции. Ниже использован каталог КФ ФИЦ ЕГС РАН Камчатки и северной группы Курильских островов. В качестве окрестности сильного землетрясения будем принимать землетрясения, отстоящие от эпицентра соответствующего главного события магнитудой M не более чем на три размера очага R (км), оцениваемого по формуле, являющейся осредненным вариантом нескольких близких выражений, представленных в работах [Соболев, 1993; Соболев, Пономарев, 2003]:

$$\lg(R) = 10^{0.5M-1.9}. \quad (4)$$

Рассчитываемую на основе выражения (4) область будем полагать зоной подготовки (форшоковой областью) землетрясения магнитудой M . Мы использовали эту формулу, а не более часто используемые соотношения [Wells, Coppersmith, 1994], потому что данный каталог землетрясений не дает ориентации очага и в этой ситуации соотношение (4) проще и предпочтительнее.

Третья аномалия, отвечающая изменениям средней глубины форшоков, как показано в работах [Rodkin, 2020; Родкин и др., 2020; Родкин, Липеровская, 2023], различна для землетрясений разных интервалов глубины. Для коровых и промежуточных землетрясений, в очагах которых предполагается наличие флюида, характерна тенденция всплывания очагов землетрясений. Для глубоких землетрясений ($H \geq 150$ км) типично увеличение средней глубины, иногда весьма значительное.

Далее выясним, насколько часто в очаговых областях отдельных сильных ($M \geq 6.5$) землетрясений реализуются статистически надежно выявляемые аномалии типа (2) или (3). В используемом каталоге КФ ФИЦ ЕГС РАН [Catalog ..., 2023] приведено 49 событий магнитудами $M \geq 6.5$. В качестве критерия статистической значимости примем вероятность случайного возникновения наблюдаемой корреляции типа (2) или (3) менее 0.1. Учитывая

характерную продолжительность развития средней аномалии около 100 дней, будем рассчитывать корреляции (аномалии) для интервалов времени 50, 100 и 200 сут до момента соответствующего сильного события. Для этих интервалов времени и пространственной области по горизонтали и по вертикали не более трех размеров очага соответствующего главного события будем рассчитывать коэффициенты регрессии между $\lg(\Delta t)$ и значениями логарифма потока событий, а также значениями средней магнитуды и глубины форшоков. Интенсивность потока событий будем оценивать для последовательных по времени групп из n событий (число событий в группе, деленное на длительность группы по времени, обычно принималось $n = 3$).

Учитывая различия механизмов разноглубинных землетрясений и нечеткий характер смены механизмов по глубине, будем отдельно рассматривать события в диапазонах 0–50 км, 50–150 км и глубже 150 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

События в интервале глубин до 50 км

На этот интервал глубин в каталоге КФ ГС РАН приходится 23 землетрясения с магнитудами $M \geq 6.5$. Будем рассматривать эти события как целевые. Знак и характер типовых прогнозных соотношений типа (2) и (3) известен из результатов, полученных ранее при анализе ООСЗ [Родкин, 2008, 2020; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016]; с уменьшением Δt поток событий возрастает, среднее значение магнитуды растет, средняя глубина для событий глубиной до 100–150 км уменьшается.

Сначала оценим средние значения коэффициентов $\{a, b\}$. Для этого для всех 23 целевых землетрясений и интервалов времени 50, 100 и 200 сут отбирались события, попавшие в форшоковую область по крайней мере одного целевого землетрясения. По этим данным строилась обобщенная окрестность и для нее вычислялись коэффициенты регрессии $\{a, b\}$; их значения представлены в табл. 1. Для аномалий, отвечающих интервалам времени 50, 100 и 200 сут до момента обобщенного сильного события, значения этих коэффициентов

регрессии $\{a, b\}$, вообще говоря, будут различны. Однако в случаях аномалий для логарифмов числа событий и средних величин магнитуды эти коэффициенты варьируют не сильно (см. табл. 1); при этом знаки аномалий отвечают ожидаемым. В случае изменения глубины форшоков в интервалах времени $\Delta t = 50$ и 100 сут статистически значимой аномалии в ООСЗ не наблюдается. Для максимального интервала времени $\Delta t = 200$ сут аномалия ООСЗ имеет место и отвечает ожидаемому уменьшению глубины.

Данные по окрестностям отдельных целевых землетрясений из выбранного интервала глубин сравниваются со значениями, соответствующими ООСЗ по всем 23 целевым землетрясениям (см. табл. 1). Для дальнейшего сопоставления будут использованы целевые землетрясения, в форшоковых областях которых получены корреляционные соотношения типа (2) или (3) требуемого уровня значимости (0.1). При рассмотрении всех трех видов аномалий и трех возможных интервалов времени 50, 100 и 200 сут для 23 целевых землетрясений данного глубинного интервала обнаружено 53 случая корреляций требуемой статистической значимости. Эти соотношения отвечают 11 разным целевым землетрясениям. Заметим, что набор событий, попадающих в интервалы времени 50, 100 и 200 сут до данного главного события, часто сильно перекрывается и значения коэффициентов регрессии $\{a, b\}$ для разных

Таблица 1. Средние значения коэффициентов регрессии для событий глубиной $0 \leq H \leq 50$ км

Интервал времени Δt , сут	Коэффициенты регрессии	
	b	a
Аномалия роста числа событий, формула (2)		
50	–0.43	5.34
100	–0.55	5.37
200	–0.61	5.41
среднее	-0.53 ± 0.09	5.37 ± 0.03
Аномалия увеличения средней магнитуды, формула (3)		
50	–0.05	4.16
100	–0.05	4.2
200	–0.05	4.1
среднее	-0.05 ± 0.01	4.16 ± 0.03
Аномалия изменения средней глубины, формула (3)		
200	4.5	25

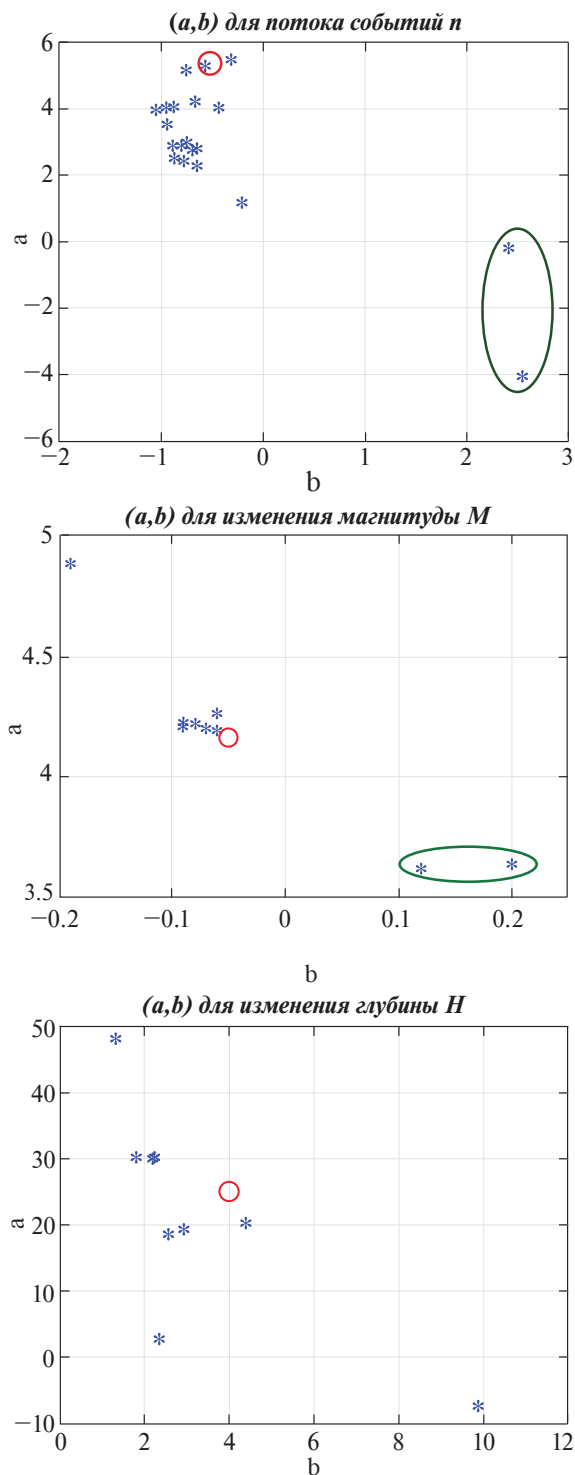


Рис. 1. Параметры уравнения регрессии $\{a, b\}$ для событий в интервале глубин $0 \leq H \leq 50$ км.

Звездочками отмечены предвестниковые окрестности отдельных землетрясений магнитудой $M \geq 6.5$, красным кружком — регрессия всех событий (ООСЗ).

а — результаты расчетов для потока событий n , формула (2); б — для изменения среднего значения магнитуды M , формула (3); в — для изменения средней глубины форшоков H , формула (3). Зеленым эллипсом отмечены 2 землетрясения, фактически являющиеся афтершоками более сильного события.

времен запаздывания часто оказываются весьма близкими.

Не во всех случаях полученный знак корреляции отвечает ожидаемому. Для двух целевых землетрясений — 29 апреля 2006 г. с $M = 6.6$ (60.54N, 167.76E) и 22 мая 2006 г. с $M = 6.6$ (60.75N, 166.10E) — по мере приближения момента целевого землетрясения наблюдается не рост, а спад интенсивности потока событий. Для этих же двух землетрясений и корреляции изменения средней магнитуды форшоков имеют не соответствующий табл. 1 знак. Однако оба эти землетрясения могут трактоваться как афтершоки сильного землетрясения с $M = 7.1$ (60.98N, 167.37E), произошедшего 20 апреля 2006 г. Утроенные очаговые области этих землетрясений перекрываются. Все три события неглубокие. Отсюда можно предположить, что режим событий в форшоковых областях целевых землетрясений 29 апреля и 22 мая больше отвечает не форшоковой активизации в преддверии этих землетрясений, а режиму афтершоков предыдущего целевого землетрясения с магнитудой 7.1.

Сопоставлять данные по форшоковым окрестностям отдельных целевых землетрясений с типовой аномалией, полученной по результатам анализа ООСЗ всей совокупности целевых землетрясений, можно исходя только из знака соответствующего эмпирического регрессионного соотношения; но более содержательным представляется сравнение пар соответствующих коэффициентов регрессионных соотношений $\{a, b\}$ со значениями, полученными для ООСЗ (см. табл. 1). На рис. 1 представлены значения коэффициентов $\{a, b\}$ значимой регрессии отдельных целевых землетрясений магнитудой $M \geq 6.5$ и глубиной до 50 км для интенсивности потока событий, средней магнитуды землетрясений и средней глубины форшоков. Эти значения сравниваются с аналогичными коэффициентами для всей совокупности целевых землетрясений данного диапазона глубины (см. красный кружок на рис. 1). Несовпадающие по знаку значения коэффициентов регрессии для землетрясений 29 апреля и 22 мая отмечены на рис. 1а, б зеленым эллипсом.

В случае изменения глубин форшоков характер регрессии оказался наименее единообразным (см. рис. 1в). Согласно мировым данным,

при неглубоких событиях доминирует механизм всплывания форшоков. На рис. 1в мы видим большой разброс значений коэффициентов регрессии $\{a, b\}$ для отдельных целевых землетрясений при положительном знаке значений b . Интегральная корреляция, для всей совокупности событий, также имеет (ожидаемый) положительный знак.

Для целевых землетрясений глубиной до 50 км выявлено 53 случая статистически значимых (на уровне 0.1) регрессий между логарифмом времени до момента главного события и интенсивностью потока событий, средней магнитудой или средней глубиной землетрясений. При этом довольно часто значения коэффициентов регрессии $\{a, b\}$ для интервалов времени 50, 100 и 200 сут до данного целевого события весьма близки. По крайней мере одна искомая аномалия наблюдается у 9 из 23 целевых землетрясений с $M \geq 6.5$. То есть 40% неглубоких целевых землетрясений могли бы быть предсказаны на основе выявленных в обобщенной окрестности типовых аномалий уже таким довольно простым способом.

Еще для двух целевых землетрясений, в действительности являющихся скорее афтершоками, типовых аномалий не наблюдается; статистически значимые аномалии в их форшоковых областях отвечают характеру афтершоковых аномалий более сильного предшествующего целевого землетрясения с $M = 7.1$; эти два события, естественно, предсказаны быть не могли.

События в интервале глубин 50–150 км

Разбиение на интервалы выше и ниже уровня 50 км связано с различием в физических процессах очагов разноглубинных землетрясений: события глубже 50 км заведомо не могут реализовываться по механизму упругой отдачи Рейда [Казахара, 1985; Калинин и др., 1989; Родкин, Рундквист, 2017]. В используемом каталоге интервалу глубин 50–150 км отвечает 14 целевых землетрясений с $M \geq 6.5$. В табл. 2 приведены значения коэффициентов регрессии $\{a, b\}$ для совокупности всех этих 14 целевых землетрясений. На рис. 2, аналогично рис. 1, дано сопоставление значений коэффициентов регрессии $\{a, b\}$ для ООСЗ всей совокупности 14 целевых землетрясений с аналогичными коэффициентами каждой статистически значимой связи для отдельного целевого землетрясения и интервалов времени упреждения 50, 100 и

Таблица 2. Средние значения коэффициентов регрессии для событий глубиной $50 \leq H \leq 150$ км

Интервал времени Δt , сут	Коэффициенты регрессии	
	b	a
Аномалия роста потока событий, формула (2)		
50	–0.51	3.9
100	–0.64	4.03
200	–0.59	3.95
среднее	-0.58 ± 0.07	3.97 ± 0.05
Аномалия увеличения средней магнитуды, формула (3)		
50	–0.10	4.48
100	–0.11	4.49
200	–0.10	4.47
среднее	-0.1 ± 0.006	4.48 ± 0.01
Аномалия изменения средней глубины, формула (3)		
50	4.89	59.9
100	5.86	59.3
200	4.17	61.4
среднее	4.97 ± 0.85	60.2 ± 1.1

200 сут. Статистически значимые регрессии были выявлены 22 раза, они наблюдались в окрестности четырех целевых землетрясений с $M \geq 6.5$.

Для отдельных целевых землетрясений знак аномалии совпадает с ожидаемым в ООСЗ в 17 из 22 случаев статистически значимых аномалий. Для двух землетрясений наблюдался спад сейсмической активности на интервале времени 50 сут перед главным событием при ожидаемом и при этом статистически достоверном росте на большем интервале времени – 100 или 200 сут. Возможно, в этих случаях имел место эффект сейсмического затишья, неоднократно описанный разными авторами (например, [Соболев, 1993; Завьялов, 2006]), но при суммировании данных по большому числу отдельных событий в ООСЗ ранее не наблюдавшийся.

По данным для событий с глубиной более 150 км статистически значимых аномалий в окрестности отдельных целевых событий выявлено не было. В целом получаем, что для используемого каталога искомые прогнозные аномалии при землетрясениях магнитудой $M \geq 6.5$ наблюдаются примерно в трети случаев.

ОБСУЖДЕНИЕ

Посмотрим теперь, для каких именно землетрясений оказывается характерным наличие прогнозируемых путем анализа ООСЗ

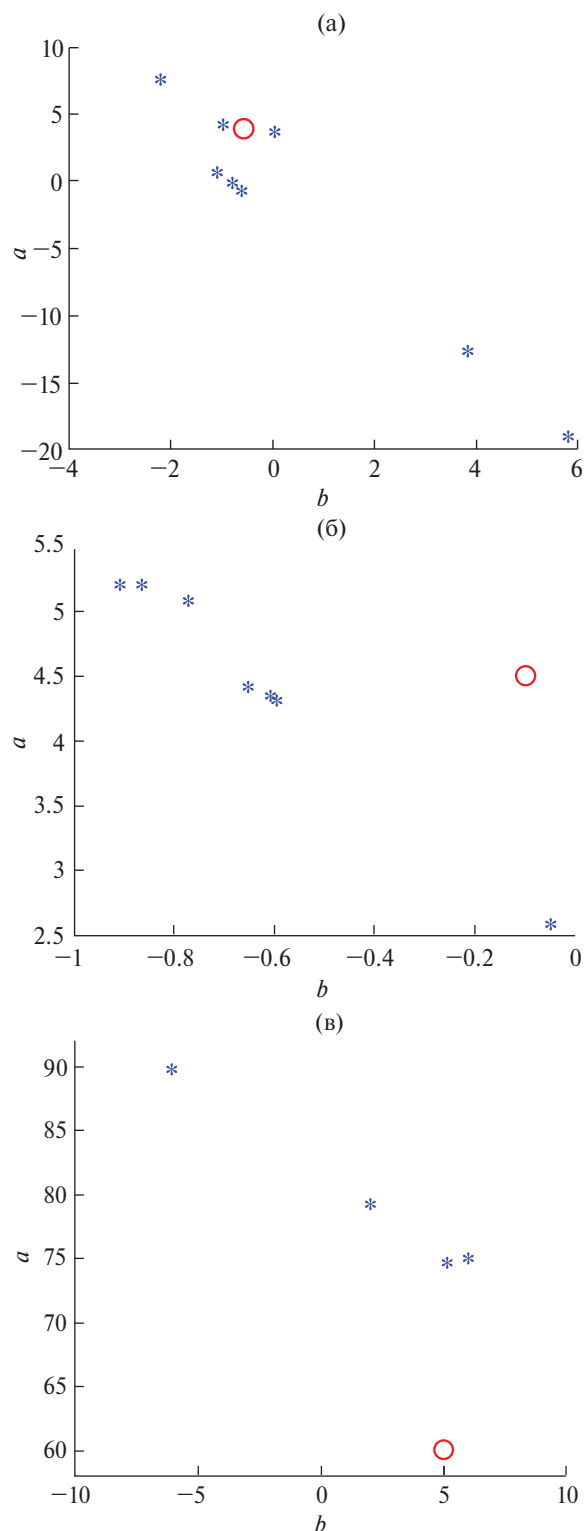


Рис. 2. Параметры уравнения регрессии $\{a, b\}$ для событий в интервале глубин $50 \leq H \leq 150$ км.

Звездочками отмечены предвестниковые окрестности отдельных землетрясений магнитудой $M \geq 6.5$, красным кружком — регрессия всех событий (ООСЗ).

a — результаты расчетов для потока событий n , формула (2); b — для изменения среднего значения магнитуды M , формула (3); v — для изменения средней глубины фолшока H , формула (3).

аномалий. В работе [Родкин, 2023] было показано, что, по данным мировых каталогов ISC-GEM и GCMT, явной тенденции к более частому выделению с помощью ООСЗ прогнозных аномалий для событий с $M \geq 7.5$ ни по глубине, ни по географическому расположению не наблюдается. При этом есть зависимости от числа событий, зарегистрированных в данной фолшоковой области, и, менее четкая, от магнитуды главного землетрясения.

Аналогичные тенденции имеют место и по данным каталога Камчатки и Северо-Курильских островов. На рис. 3 представлены данные по числу N удовлетворительно полно зарегистрированных землетрясений с $M \geq 3.6$, произошедших на расстоянии в $3R$ окрестности целевых землетрясений с $M \geq 6.5$ в интервале времени 100 дней перед целевым, где R рассчитывается по формуле (4). Из этого рисунка видно, что ни одно из целевых землетрясений, в окрестности которого было зарегистрировано менее 10 надежно регистрируемых событий $M \geq 3.6$, предсказано не было. Напротив, 13 из 19 целевых землетрясений, в фолшоковой области которых было зарегистрировано 20 и более событий, были ретроспективно предсказаны. При этом из 6 непредсказанных целевых землетрясений два события с магнитудой $M = 6.6$ оказались в афтершоковой области предшествующего целевого землетрясения с $M = 7.1$; как уже отмечалось выше, для них путем анализа ООСЗ также были выявлены статистически значимые аномалии, но отвечающие афтершоковому, а не фолшоковому режиму.

Из рис. 3 видно, что доля ретроспективно спрогнозированных землетрясений имеет тенденцию расти с магнитудой. Но эта тенденция существенно менее четкая, чем для числа событий. Скорее всего, она вторична и связана с тем, что размер фолшоковой области растет с магнитудой, соответственно, увеличивается, в среднем, и число событий, регистрируемых в фолшоковой области. Заметим, что эта тенденция хорошо согласуется с результатами применения известного алгоритма прогноза землетрясений M8. Опыт применения этого и других алгоритмов говорит, что успешность прогноза растет с магнитудой главного события [Кособоков, Соловьев, 2015; Ismail-Zadeh, Kossobokov, 2020]. В частности, получаемые

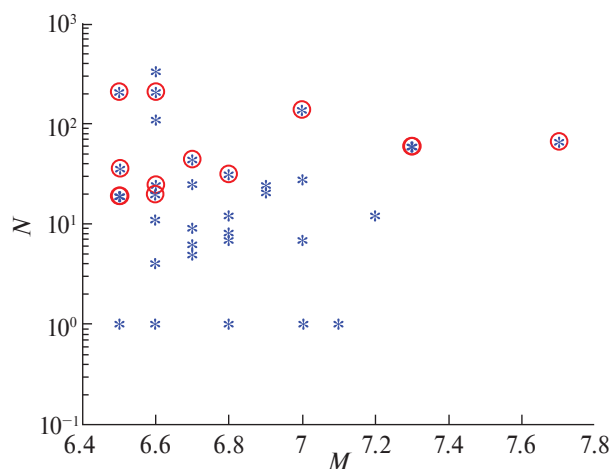


Рис. 3. Магнитуды целевых землетрясений (звездочки) и землетрясений, ретроспективно предсказанных по ним (красные кружки), а также число (N) событий магнитудой $M \geq 3.6$, зарегистрированных в их форшоковых областях (часть точек перекрываются).

с использованием алгоритма М8 прогнозы довольно успешны для событий с $M \geq 8.0$, но расширение области применения алгоритма М8 на более слабые события приводит к сильному ухудшению качества прогноза.

Сравним теперь, используя ранее опубликованные данные по ретроспективному прогнозу событий с $M \geq 7.5$ по мировым каталогам ISC-GEM и GCMT [Родкин, 2023], эффективность ретроспективного прогноза по данным разных каталогов (табл. 3). Как видно из табл. 3, доля ретроспективно предсказанных землетрясений минимальна (всего 4%) для наименее полного каталога ISC-GEM, выше (12%) — для более полного каталога GCMT, еще выше (27%) — для регионального каталога Камчатки и Северных

Курил. Такая тенденция вполне соответствует данным рис. 3, согласно которым доля ретроспективно прогнозируемых землетрясений в решающей степени зависит от числа слабых событий, зарегистрированных в форшоковой области данного сильного землетрясения. Добавим, что, согласно работе [Родкин и др., 2023], в обеих областях подготовки дублета сильных ($M \geq 7.5$) Турецких землетрясений 06.02.2023 были зарегистрированы аномалии, выявленные по ООСЗ. Используемый в работе [Родкин и др., 2023] региональный каталог землетрясений Турции является наиболее детальным ($M_c = 2.0$) из всех рассмотренных в данной работе. Предположительное наличие означенной тенденции позволяет поставить задачу прогноза землетрясений иначе: какова должна быть система регистрации землетрясений, чтобы получать прогнозные аномалии целевых событий магнитудой $M > 0$ с вероятностью не ниже p .

Полученные результаты представляются обнадеживающими, но доля ретроспективно выявляемых сильных землетрясений пока неудовлетворительна. В плане дальнейшей отработки нового алгоритма прогноза планируется увеличить число сравниваемых типовых аномалий, выявленных с помощью ООСЗ (что осуществимо, например, при использовании каталогов сейсмических моментов, таких как GCMT), усложнить алгоритм сравнения с идеальной моделью, рассматривая совокупность аномалий, и при этом уменьшить требование к уровню достоверности каждого отдельного прогнозного признака. Надо полагать, что доля ретроспективно спрогнозированных землетрясений при

Таблица 3. Доля “предсказанных” сильных событий

Каталоги	Число событий	Число выявленных аномалий	Число целевых событий с аномалиями	Доля “предсказанных” землетрясений, %
Мировые	$M \geq 7.5$			
ISC-GEM (1904–2014)	414	75	23	4
GCMT (1976–2023)	117	40	14	12
Камчатка – Северные Курилы (1962–2020)	$M \geq 6.5$			
	49	59	13	27
Южная Турция (2015–2023)	$M \geq 7.5$			
	2	4	2	100

этом увеличится. Также планируется перейти к использованию более детальных каталогов, что увеличит число слабых событий в форшоковых областях сильных землетрясений. Подчеркнем, что все еще неисследованной остается частота получения ложных тревог.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения позволяет получить детальные и хорошо параметризуемые образы набора типовых форшоковых и афтершоковых аномалий. С использованием данных регионального каталога Камчатки и Северных Курил КФ ФИЦ ЕГС РАН рассматривался вопрос, насколько часто такие аномалии могут статистически надежно выявляться в очаговых областях отдельных сильных землетрясений. Для данного каталога по крайней мере одна аномалия (а чаще несколько) выявляется с помощью ООСЗ примерно для трети событий магнитудой $M \geq 6.5$. При этом вероятность получения ретроспективного прогноза конкретного землетрясения в решающей степени зависит от числа слабых землетрясений, зарегистрированных в его форшоковой области. При регистрации в форшоковой области 40 и более событий доля ретроспективно спрогнозированных сильных ($M \geq 6.5$) событий приближается к 80%.

Тенденция к росту доли ретроспективно прогнозируемых событий подкрепляется результатами анализа для событий с $M \geq 7.5$ по данным мировых каталогов ISC-GEM и GCMT и для дублета сильных Турецких землетрясений 2023 г. Предложены варианты развития рассмотренного метода прогноза; обращается внимание на нерешенность проблемы ложных тревог.

Полученные результаты позволяют по-новому взглянуть на задачу прогноза землетрясений в целом: какова должна быть система регистрации землетрясений, чтобы получать прогнозные аномалии целевых событий магнитудой $M > 0$ с вероятностью не ниже заданной.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Тахир С. Ирмаку (кафедра геофизической инженерии, Университет Коджаэли, Коджаэли, Турция) за предоставление

регионального каталога землетрясений района дублета Турецких землетрясений 06.02.2023 г.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН и ИМГиГ ДВО РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
- Кособоков В.Г., Соловьев А.А.* Об оценке результатов тестирования алгоритмов прогноза землетрясений // Доклады РАН. 2015. Т. 460. № 6. С. 710–712.
- Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С.* Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука, 1989. 158 с.
- Касахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
- Рогожин Е.А.* Сейсмотектоника центрального сектора Большого Кавказа как основа для сейсмического мониторинга и оценки опасности // Вестник Владикавказского Научного Центра. 2009. Т. 9. № 4. С. 16–22.
- Родкин М.В.* Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 66–77.
- Родкин М.В., Никитин А.Н., Васин Р.Н.* Сейсмотектонические эффекты твердофазных превращений в геоматериалах. М.: ГЕОС, 2009. 198 с.
- Родкин М.В., Рундквист Д.В.* Геофлюидодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. Долгопрудный: Интеллект, 2017. 288 с.
- Родкин М.В., Андреева М.Ю., Григорьева О.О.* Анализ обобщенной окрестности сильного землетрясения по региональным данным, Курило-Камчатский регион // Вулканология и сейсмология. 2020. № 6. С. 67–77.
- Родкин М.В.* Типовая фор- и афтершоковая аномалия — эмпирика, интерпретация // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 64–76.
- Родкин М.В., Липеровская Е.В.* О различии физических механизмов разноглубинных землетрясений и характера их ионосферного отклика // Физика Земли. 2023. № 3. С. 48–62.

- Родкин М.В. Новый алгоритм прогноза землетрясений — подходы и вопросы // Тезисы. III Всероссийская научная конференция с международным участием “Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений” (25–26 октября 2023 г.). М.: ИТПЗ РАН, 2023. С. 215–219.
- Родкин М.В., Ирмак Т.С., Таймаз Т. Дублет сильных землетрясений в Турции 6 февраля 2023 г. обозначил ряд проблем // Тезисы докладов. IX Всероссийская научно-техническая конференция “Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов” (24–30 сентября 2023 г.). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. С. 23–24.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 273 с.
- Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits // Bulletin Earthquake Research Institute University. 1965. V. 43. P. 237–239.
- Bridgman P.W. Polymorphic Transitions and Geological Phenomena // American Journal of Science. 1945. V. A 243(1). P. 90–96.
- Catalog of earthquakes in Kamchatka and the Commander Islands. Available from: <https://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue> (Last Accessed November 11, 2023).
- Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. Earthquakes Cannot Be Predicted // Science. 1997. V. 275(5306). P. 1616–1616.
<https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
- Houston H. Deep earthquakes // Treatise on Geophysics, 2nd ed. V. 4. Oxford: Elsevier, 2015. P. 329–354.
- Ismail-Zadeh A., Kossobokov V.G. Earthquake prediction, M8 algorithm // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics / Ed. H.K. Gupta. Cham: Springer, 2020. P. 204–207.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_157-1
- Jordan T.H., Chen Y.-T., Gasparini P. et al. Operational earthquake forecasting — state of knowledge and guidelines for utilization // Annals Geophysics. 2011. V. 54. № 4. P. 315–391.
- Kagan Y.Y., Jackson D.D. Probabilistic forecasting of earthquakes // Geophys. J. Intern. 2000. V. 143. Iss. 2. P. 438–453.
- Rodkin M.V. Patterns of seismicity found in the generalized vicinity of a strong earthquake: Agreement with common scenarios of instability development // Extreme Events and Natural Hazards: The Complexity Perspective / Eds A.S. Sharma et al. Washington, DC: American Geophysical Union, 2012. P. 27–39.
<https://doi.org/10.1029/2011GM001060>
- Rodkin M.V., Mandal P. A possible physical mechanism for the unusually long sequence of seismic activity following the 2001 Bhuj $M_w 7.7$ earthquake, Gujarat, India // Tectonophysics. 2012. V. 536–537. P. 101–109.
- Rodkin M.V., Tikhonov I.N. The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake // Physics and Chemistry of the Earth. 2016. V. 95. P. 73–84.
- Rodkin M.V. The Variability of Earthquake Parameters with the Depth: Evidences of Difference of Mechanisms of Generation of the Shallow, Intermediate-Depth, and the Deep Earthquakes // Pure Appl. Geophys. 2022. V. 179. P. 4197–4206.
<https://doi.org/10.1007/s00024-021-02927-4>
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // BSSA. 1994. V. 84(4). P. 974–1002.

ON THE IDENTIFICATION OF TYPICAL PRECURSOR ANOMALIES IN THE FORESHOCK AREAS OF STRONG EARTHQUAKES, KURIL-KAMCHATKA REGION

M. V. Rodkin^{1, 2, 3, *}, M. Yu. Andreeva²

¹*Institute for Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the RAS,
Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow, 117997 Russia*

²*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the RAS,
Nauki str., 1B, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Russia*

³*Shmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS,
Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

*e-mail: rodkin@mitp.ru

The article discusses the prospects of a new earthquake forecast algorithm based on a set of precursor anomalies previously identified in details as a result of constructing and analyzing a generalized vicinity of a strong earthquake. The difference in physical mechanisms of different depth earthquakes is taken into account. The question is considered, how often typical averaged anomalies can be statistically reliably identified in the foreshock areas of individual strong earthquakes; the regional catalog of Kamchatka and Northern Kuril Islands of the Kamchatka Branch of the Geophysical Surveys of the Russian Academy of Sciences is used. In this catalog, at least one typical anomaly is detected in one third of cases of the target earthquakes with magnitude $M \geq 6.5$. The probability of such successful retrospective forecast depends to a decisive extent on the number of events registered in the foreshock zone of a given strong earthquake. This result is supported by the results of the analysis of the world ISC-GEM and GCMT catalogs and the 2023 Turkish Earthquake Doublet. The possibilities for the development of the used forecast method are discussed; attention is drawn to the problem of false alarms.

Keywords: earthquake forecasting, typical forecast anomalies, physics of seismic destruction, Kuril-Kamchatka

УДК 550.348

О ПРОЯВЛЕНИИ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ($M_w \geq 6.6$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ

© 2025 г. Г. Н. Копылова*, Ю. К. Серафимова, В. А. Касимова

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

*e-mail: gala@emsd.ru

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.

После доработки 15.11.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

Приводится обзор работ по поискам предвестников землетрясений в районе п-ова Камчатка в сравнении с главными элементами сейсмического режима территории за период детальных сейсмологических наблюдений в 1962–2022 гг. — кумулятивным графиком выделения сейсмической энергии и произошедшими сильными землетрясениями. Особенностью наблюдательной сети является расположение места большинства “несейсмологических” видов наблюдений за предвестниками на небольшой территории Петропавловск-Камчатского полигона (ПКП). Анализ 14-ти видов сейсмических, геофизических и геохимических предвестников семи мелко- и среднефокусных землетрясений 2005–2022 гг. с $M_w = 6.6–7.7$ показал рост числа предвестников N с увеличением параметра M_w/lgd_h (где d_h — гипоцентрального расстояния до центра ПКП (км)), характеризующего относительную интенсивность подготовки землетрясений в районе ПКП. Такая зависимость между N и M_w/lgd_h прослеживается для межплитовых (субдукционных) землетрясений в Камчатской части Курило Камчатской островной дуги, что согласуется с проявлениями предвестников 1987–2004 гг. и отражает свойство их комплексного проявления перед землетрясениями, наиболее сильными и близкими к территории ПКП. Перед такими событиями эффект комплексного проявления предвестников (ЭКПП) наблюдался у не менее 80% предвестников из всех рассматриваемых в настоящей работе. Для таких землетрясений соотношение между гипоцентральным расстоянием d_h и размером очага L (км) составляет $d_h/L = 3.8–1.6$, т.е. ЭКПП характерен для ближней и средней (промежуточной) зон очага будущего землетрясения. На примере четырех отдельных видов предвестников показано, что их пороговые величины d_h/L для событий с $M_w \geq 6.6$ составляют 5.0–8.5. Показано, что если при сейсмическом прогнозировании ЭКПП диагностирован в режиме реального времени, то, используя установленную для него пороговую величину $d_h/L \leq 3.8$, можно существенно ограничить возможный диапазон расстояний от будущего сильного землетрясения до района ПКП и Петропавловск-Елизовской городской агломерации с большей точностью, чем при использовании данных по отдельным видам предвестников.

Ключевые слова: землетрясения, предвестники, магнитуда, прогноз землетрясений, Камчатка

DOI: 10.31857/S0203030625010062, EDN: GIODUP

ВВЕДЕНИЕ

Проблема прогноза землетрясений является одной из широко обсуждаемых в науках о Земле в XX–XXI вв. Перспективы прогноза сильных землетрясений связаны с обнаружением их предвестников в изменениях сейсмичности,

деформациях земной коры, изучением параметров геофизических и геохимических полей.

Район п-ова Камчатка — один из наиболее сейсмоопасных регионов России. Здесь в течение нескольких последних десятилетий проводятся исследования по поиску предвестников землетрясений [Гордеев и др., 2013].

В настоящей работе приводится обзор таких исследований в сравнении с главными элементами сейсмического режима территории за период детальных сейсмологических наблюдений в 1962–2022 гг. Основное внимание уделяется ретроспективной оценке эффекта комплексного проявления предвестников, его связи с параметрами последующих землетрясений и перспективам его практического применения при прогнозировании сильных землетрясений на Камчатке.

СЕЙСМИЧНОСТЬ

Вблизи восточного побережья Камчатки возможны землетрясения с величинами магнитуд до 8–9, которые сопровождаются цунами и сотрясениями на побережье до 9–10 баллов по шкале MSK-64 [Медведев и др., 1965], что может привести к катастрофическим последствиям для населения и инфраструктуры урбанизированных территорий Камчатского края. Наиболее уязвимым для землетрясений является район Петропавловск-Елизовской агломерации с населением около 250 тыс. человек. Города Петропавловск-Камчатский, Елизово и Вилучинск расположены вблизи побережья Авачинского залива и находятся в зоне 9-балльных сотрясений согласно карте Общего сейсмического районирования РФ [Уломов и др., 2016]. При возникновении 9-балльного землетрясения здесь возможны безвозвратные потери среди населения и разрушение зданий и сооружений. Поэтому прогнозирование землетрясений с величинами магнитуд порядка 7 и более, которые могут сопровождаться сотрясениями до 7–9 баллов в этом районе, является необходимым для организации превентивных мероприятий – сейсмоукрепления домов и сооружений, реализации комплекса мер по предотвращению и ликвидации последствий.

В соответствии с актуальными каталогами землетрясений для района п-ва Камчатка ([Гусев, 2008; Гусев, Шумилина, 2004], <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>, <http://sdis.emsd.ru>), за период детальных сейсмологических наблюдений с 1962 по 2022 г. средняя повторяемость землетрясений с $M_w \geq 7.5$ составляет 0.17 год^{-1} (10 событий за 60 лет), т.е. 1 событие в 6 лет (рис. 1а, табл. 1).

Главные особенности сейсмического режима в зоне ответственности Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН ($\varphi = 49\text{--}62^\circ \text{ с.ш.}$, $\lambda = 152\text{--}172^\circ \text{ в.д.}$) [Левина и др., 2012] отражаются в поведении кумулятивного графика выделения сейсмической энергии (см. рис. 1в, верхний график) в сравнении с произошедшими землетрясениями с $M_w \geq 6.8$, средняя повторяемость которых составляет 0.47 событий в год (28 событий за 60 лет), т.е. примерно одно событие в два года.

Из сопоставления графиков (см. рис. 1в) следует связь всплесков выделения сейсмической энергии с возникновением землетрясений с величинами $M_w \geq 7.5$. В 2008 и 2013 гг. рост выделения сейсмической энергии был обусловлен возникновением сильных землетрясений в верхней мантии на глубинах 610–630 км (см. табл. 1, № 7 ($M_w = 7.7$) и № 8 ($M_w = 8.3$)). Такие землетрясения, из-за глубокого расположения их очагов, сопровождались незначительными поверхностными проявлениями. Интенсивность сотрясений на территории п-ова Камчатка при таких землетрясениях составляла $I_{\text{MSK-64}} \leq 5$ баллов (см. табл. 1). То есть такие землетрясения, несмотря на их значительный энергетический эффект, не сопровождались катастрофическими последствиями для инфраструктуры, населения и природной среды Камчатского края, в то время как землетрясения с $M_w \geq 7.5$ в коре на глубинах $H = 7\text{--}48$ км сопровождались сотрясениями в плейстосейстовых областях интенсивностью $I_{\text{MSK-64}} \geq 5\text{--}6$ баллов. Во время Усть-Камчатского, Петропавловского, Кроноцкого и Олюторского землетрясений интенсивность сотрясений на территории Камчатского края достигала 7–9 баллов [Константинова, 2020; Сильные ..., 1975]. При этих землетрясениях в отдельных населенных пунктах отмечались конструктивные повреждения зданий и сооружений, негативные инженерно-геологические процессы – разжижение и просадка грунта, обвалы и осыпи. Именно такие мелко- и среднефокусные сейсмические события являются первостепенным объектом сейсмического прогнозирования с целью заблаговременной оценки времени и места их возникновения и организации превентивных мероприятий для уменьшения негативных последствий.

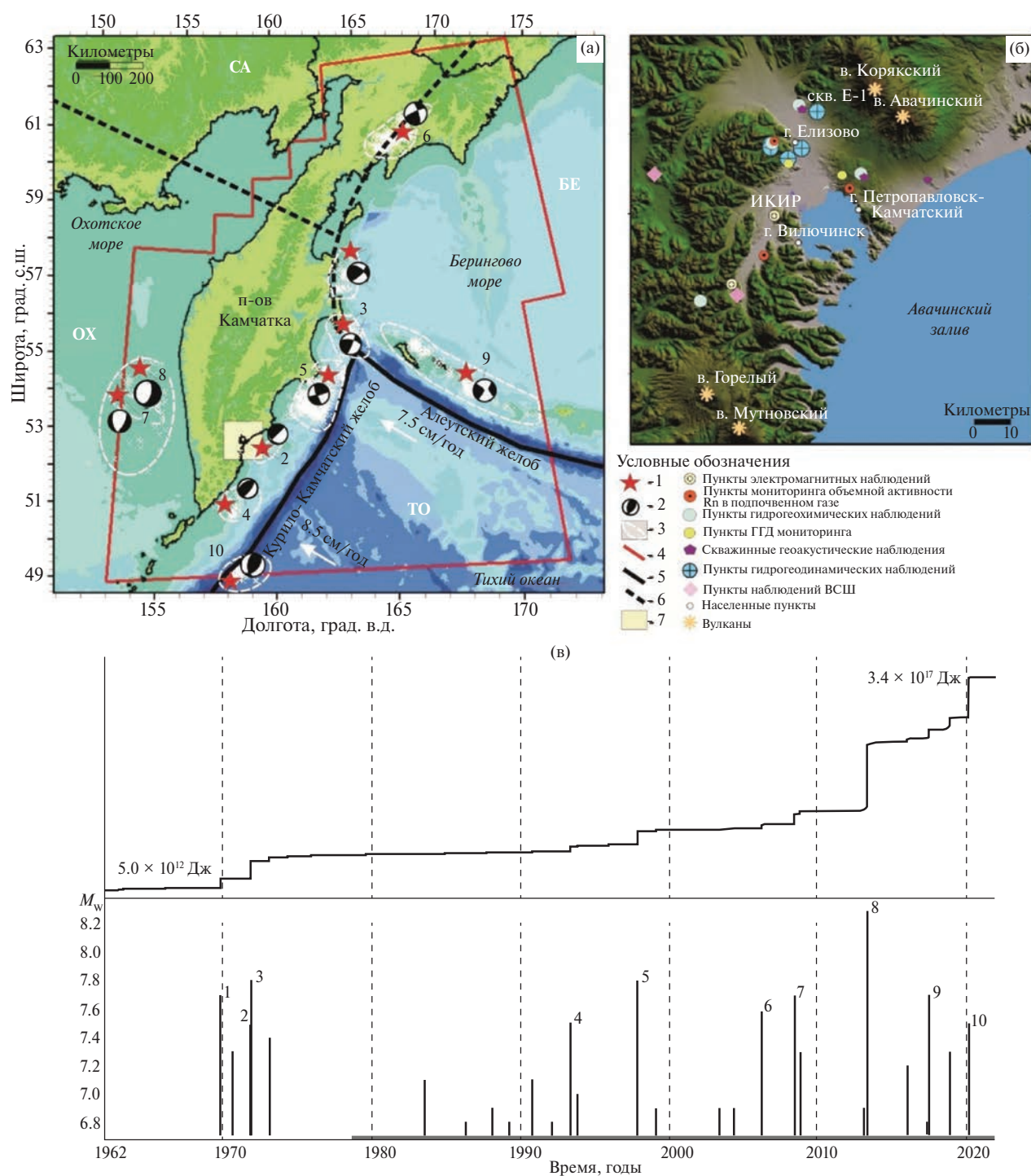


Рис. 1. Район п-ова Камчатка, расположение эпицентров землетрясений с $M_w \geq 7.5$ и их очагов по афтершокам первых суток (показаны белыми крестиками) за период 1962–2022 гг. (а): 1 – эпицентры землетрясений с $M_w \geq 7.5$ (нумерацию землетрясений см. в табл. 1), 2 – механизмы очагов по данным каталога CMT [http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html, дата обращения 14.10.2023], 3 – очаги землетрясений по афтершокам первых суток, 4 – границы зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН, 5 – границы литосферных плит Тихоокеанской океанической (ТО) и континентальных плит Охотоморской (ОХ), Берингийской (БЕ) и Северо-Американской (СА) [Гордеев и др., 2015; Argus, Gordon, 1991; Kozhurin, 2007], 6 – предполагаемые границы литосферных плит, 7 – территория Петропавловск-Камчатского полигона; схема расположения пунктов по различным видам наблюдений на территории Петропавловск-Камчатского полигона (б); кумулятивный график выделения сейсмической энергии в диапазоне глубин 0–700 км в 1962–2021 гг. (верхняя панель) и распределение во времени землетрясений с $M_w \geq 6.8$ (нижняя панель: цифрами обозначены землетрясения с $M_w \geq 7.5$, номера соответствуют номерам в табл. 1) (в). Жирной горизонтальной линией показан период проведения работ на территории ПКП по поиску предвестников землетрясений с использованием комплекса методов (пояснения см. в тексте).

Таблица 1. Землетрясения 1969–2022 гг. с $M_w \geq 7.5$, произошедшие в Камчатском регионе в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН ($\phi = 49 - 62$ с.ш., $\lambda = 152 - 172$ в.д.)

№ п/п	Дата	Время ч:мин:с	Широта, ф, град. с.ш.	Долгота, λ , град. в.д.	Глубина, км	M_w^*	M_w по [ГШ, 2004; Г, 2008]	d_e^{**} (d_h), км	$M/\lg d_h$	Балл ^{***} , MSK-64	Примечание
1	22.11.1969	23:09:31	57.93	164.00	40	7.4	7.7	640 (641)	2.74	6–7 Усть-Камчатск; 4–5 Оссора; 4 Никольское; 3–4 Палана; 3 Эссо	Озерновское ЗТ
2	24.11.1971	19:35:29	52.71	159.47	110	7.3	7.5	66 (128)	3.56	7 ПТР, 6 Елизово; 5–6 Никольское; 5 Усть-Камчатск; 4–5 Мильково; 4 Усть-Большеречк; 3–4 Соболево	Петропавловское ЗТ
3	15.12.1971	08:29:55	55.97	163.35	20	7.6	7.8	447 (448)	2.94	6–7 Усть-Камчатск, Никольское; 3–4 Мильково, ПТР; 3 Тигиль	Усть-Камчатское ЗТ
4	08.06.1993	13:03:37	51.20	157.80	40	7.5	7.5	206 (209)	3.23	5 Вилучинск; ПТР; Елизово; 4 Усть-Большеречк, Мильково; 3 Усть-Камчатск; 2 Никольское	ЗТ на юге Камчатки
5	05.12.1997	11:26:51	54.64	162.55	10	7.8	7.8	315 (315)	3.12	5–6 ПТР; 5 Усть-Камчатск, Елизово; 4 Никольское, Мильково; 3 Эссо, Тигиль, Соболево; 2 Усть-Большеречк	Кроноцкое ЗТ

Таблица 1. Окончание

6	20.04.2006	23:25:02	60.98	167.37	1	7.6	7.6	1025 (1025)	2.52	9 Корф Юлоторское ..., 2007], 8–9 Тилички; 6 Каменское; 5–6 Оссора; 4–5 Палана; 2 Усть-Камчатск	Олюторское ЗТ
7	05.07.2008	02:12:04	53.99	152.84	576	7.7		394 (698)	2.71	4 Усть-Камчатск; 3–5 ПТР; 3–4 Усть- Большерецк; 3 Елизово; 3 Вилучинск	Мантийное ЗТ с эпицентром в Охотском море
8	24.05.2013	05:44:49	54.75	153.79	630	8.3		368 (730)	2.90	5 ПТР; 4–5 Елизово, Вилучинск, Усть-Камчатск; 4 Мильково, Тигиль, Никольское; 3–4 Усть- Большерецк, Эссо, Палана; 3 Соболево; 2 Оссора	Мантийное Охотоморское ЗТ в эпицентром в Охотском море
9	17.07.2017	23:34:14	54.35	168.90	7	7.7		690 (691)	2.71	5–6 Никольское; 3 Усть-Камчатск; 2–3 ПТР	Ближне-Алеутское ЗТ
10	25.03.2020	02:49:21	49.11	158.08	48	7.5		430 (433)	2.84	6–7 Северо- Курильск; 4–5 ПТР; 2–3 Никольское	Парамуширское ЗТ

Примечание. * – магнитуда по данным каталога NEIC [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map, дата обращения 05.05.2024 г.]; ** – эпицентральное расстояние до г. Петропавловск-Камчатский (53.0° с.ш., 158.6° в.д.), в скобках указано гипотендральное расстояние; *** – балл землетрясения по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН [http://sdis.emsd.ru, дата обращения 05.05.2024 г.]; ПТР – г. Петропавловск-Камчатский; ГШ, 2004 – [Гусев, Шумилина, 2004]; Г, 2008 – [Гусев, 2008]; жирным шрифтом выделены землетрясения, предвестники которых рассматриваются в настоящей статье.

ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

С 1961 г. на Камчатке ведутся детальные сейсмические наблюдения и разрабатываются методы использования получаемых данных для прогноза сильных землетрясений. С 1977–1979 гг. на постоянной основе проводятся гидрогеохимические, гидрогеодинамические и другие виды наблюдений. Именно с этого времени, т.е. с конца 1970-х гг. начался этап поиска предвестников землетрясений по комплексу методов. В 1990–2000 гг. увеличивалось разнообразие способов наблюдения за предвестниками, но основное число пунктов наблюдений было по-прежнему сосредоточено на территории Петропавловск-Камчатского полигона (ПКП), включающего район Петропавловск-Елизовской агломерации (см. рис. 1а, 1б).

В работах [Чебров и др., 2011, 2013в; Копылова, Серафимова, 2009; Серафимова, Копылова, 2010] приведено описание сетей наблюдения за предвестниками, методик их выявления, используемых для прогнозирования землетрясений, а также ретроспективные оценки сейсмопрогностической эффективности отдельных методов по состоянию на первое десятилетие XXI в. Из этих работ следовал вывод о недостаточной эффективности отдельных методов для прогнозирования камчатских землетрясений с $M \geq 6.0$ и обеспечения вероятностной оценки среднесрочных и краткосрочных прогнозов сильных землетрясений.

В работах [Копылова, Серафимова, 2009; Серафимова, Копылова, 2010] было показано, что в условиях существующей сети прогностических наблюдений в районе ПКП предвестники проявлялись по комплексу методов перед землетрясениями с $M = 6.6–7.8$, произошедшими южнее полуострова Кроноцкий (55° с.ш.). Для таких землетрясений отношение величины магнитуды M_w к логарифму гипоцентрального расстояния до центра ПКП d_h (км) составляло $M_w/\lg d_h \geq 3.0$.

Во втором десятилетии XXI в. сейсмопрогностические исследования в районе п-ова Камчатка продолжали развиваться. Оценку сейсмической опасности, представленную в виде долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных прогнозов землетрясений, осуществляли специализированные советы по прогнозу

землетрясений путем экспертного анализа всех видов сейсмопрогностических данных [Чебров и др., 2011; Фирстов и др., 2016]. Большая часть видов наблюдений и сейсмопрогностических методов, на основе которых проводилось определение предвестников, реализовывались в Камчатском филиале Геофизической службы РАН. Исследования по прогнозированию землетрясений с предоставлением регулярных сейсмопрогностических заключений для Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) также осуществлялись Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН, Институтом физики Земли (ИФЗ) РАН, Институтом вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН, подразделениями Министерства природных ресурсов, проводящими мониторинг опасных эндогенных геологических процессов на территории Камчатского края [Чебров и др., 2021].

По некоторым видам наблюдений, в частности по измерениям объемной активности радона в почвенном газе, наблюдениям за высокочастотным сейсмическим шумом (ВСШ), гидрогеологическим наблюдениям в скважинах на территории ПКП, были обобщены результаты многолетних работ, направленных на обнаружение предвестников землетрясений, и уточнены оценки сейсмопрогностической эффективности соответствующих видов предвестников для прогнозирования землетрясений в районе п-ова Камчатка [Салтыков, 2017; Фирстов, Макаров, 2018; Копылова, Болдина, 2023; Kopylova, Boldina, 2020].

Разрабатывались и внедрялись в практику сейсмопрогностических исследований новые методы обработки данных каталога землетрясений Камчатки [Салтыков, 2011] и ведения непрерывных сейсмических записей на сети широкополосных станций территории п-ова Камчатка [Касимова и др., 2018; Копылова и др., 2021; Любушин и др., 2015; Kopylova et al., 2022], нацеленные на увеличение области прогнозирования землетрясений и сейсмопрогностическую оценку всей территории Камчатского края по сейсмологическим данным. В работе [Салтыков, Воропаев, 2017] рассматривалась возможность комплексирования

сейсмопрогностических данных по различным методам прогноза. В работе [Копылова, 2013] было предложено дополнить практику экспертных оценок сейсмопрогностических данных количественным параметром, характеризующим относительное число методов, по которым фиксировались сигналы, свидетельствующие о возможности возникновения сильного землетрясения. Полагалось, что изучение поведения такого параметра при сопоставлении с произошедшими землетрясениями может быть полезным при разработке формализованного подхода к анализу комплексного проявления предвестников.

В настоящей работе, в продолжение сейсмопрогностических исследований, освещенных в публикациях 2009–2016 гг., рассматриваются по литературным и авторским данным предвестники мелко- и среднефокусных землетрясений 2005–2022 гг. с магнитудами $M_w \geq 6.6$, произошедших в Камчатской части Курило-Камчатской островной дуги и в области ее сочленения с Алеутской островной дугой (см. рис. 1а, рис. 2).

Изучение эффекта комплексного проявления предвестников проводилось по данным о проявлении пяти видов предвестников сильных, $M_w \geq 6.6$, землетрясений 1987–2004 гг. [Серафимова, Копылова, 2010] совместно с результатами анализа 14-ти видов предвестников землетрясений 2005–2022 гг., представленными в настоящей работе. Под “эффектом комплексного проявления предвестников” (ЭКПП) понимается проявление перед отдельным землетрясением не менее 80% видов предвестников из всех рассматриваемых, т.е. не менее четырех видов предвестников из пяти для периода 1987–2004 гг. и не менее 11 видов из 14-ти для периода 2005–2022 гг.

В качестве параметров, характеризующих интенсивность подготовки отдельных землетрясений в районе ПКП, используются отношения M_w/lgd_h и d_h/L , где d_h – гипоцентрально-расстояние до центра ПКП (км), L – размер очага землетрясения (км). Параметр M_w/lgd_h , ранее использовавшийся в работах [Копылова, Серафимова, 2009; Серафимова, Копылова, 2010], в настоящей работе приводится для сохранения преемственности с предшествующими результатами изучения предвестников

камчатских землетрясений. Параметр d_h/L показывает относительную удаленность наблюдательных пунктов на территории ПКП от гипоцентра землетрясения в размерах его очага. Этот параметр имеет более ясный физический смысл по сравнению с параметром M_w/lgd_h и ранее использовался авторами при анализе гидрогеодинамических и гидрогеохимических предвестников камчатских землетрясений [Копылова и др., 2022; Kopylova, Boldina, 2020]. Для всех рассматриваемых землетрясений расчет размеров очагов L проводился по формуле $lgL = 0.43M - 1.27$ [Завьялов, Зотов, 2021].

В настоящей работе данные о землетрясениях 1962–2022 гг. были уточнены, величины их магнитуд приводятся в соответствии с каталогом землетрясений USGS/NEIS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>). Данные о расположении и глубинах гипоцентров землетрясений приводятся по Региональному каталогу землетрясений Камчатки, составленному КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://sdis.emsd.ru>).

ПРОЯВЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

На рис. 1 выделен период работ по поиску предвестников землетрясений в районе п-ова Камчатка с использованием комплекса методов. При этом очаги землетрясений 1983–1991 гг. с магнитудами 6.8–7.1 (см. рис. 1в, нижняя панель) находились на значительном удалении от ПКП и величина отношения M_w/lgd_h для них составляла менее 3.0. Поэтому наиболее вероятной причиной отсутствия эффектов комплексного проявления предвестников перед большинством сильных землетрясений 1983–1991 гг. является значительная удаленность сейсмических событий от территории ПКП.

Лишь перед землетрясением 6 октября 1987 г. с магнитудой $M_w = 6.5$ ($M_s = 6.6$ по определениям ФИЦ ЕГС РАН [Зобин и др., 1990]), произошедшем на расстоянии $d_h = 115$ км от ПКП ($M/lgd_h = 3.2$), наблюдался ЭКПП по четырем видам предвестников из пяти рассматриваемых [Серафимова, Копылова, 2010]. Перед этим землетрясением предвестники в изменениях уровня воды в скважине Е-1 [Копылова, 2001], химического состава воды из двух самоизливающихся скважин [Копылова и др., 1994;

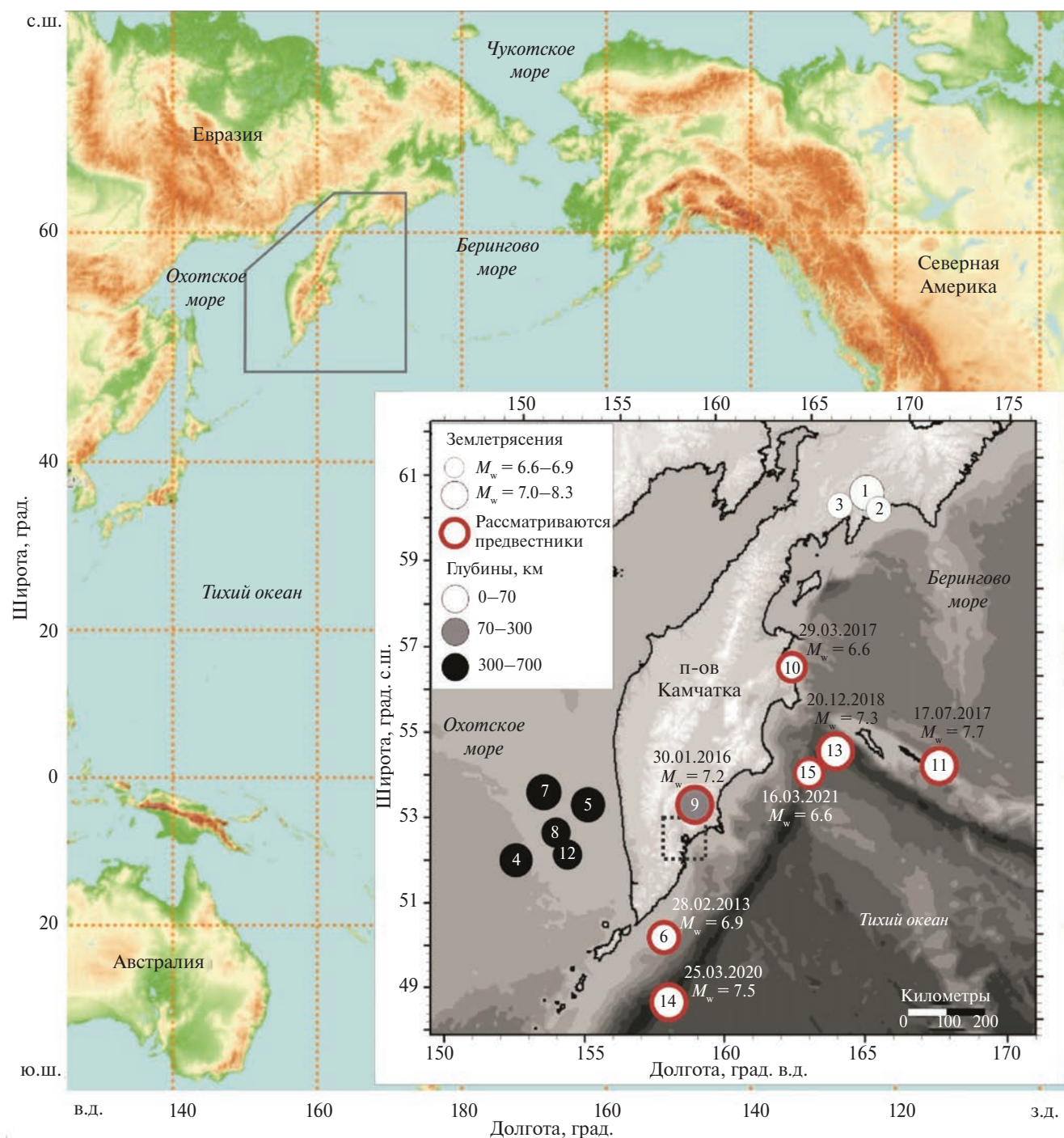


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений с $M_w \geq 6.6$ за период 2005–2022 гг. (нумерация согласно табл. 2). Белыми кружками показаны мелкофокусные землетрясения, серыми – среднефокусные, черными – глубокофокусные ($H = 300–700$ км). Красной обводкой отмечены мелко- и среднефокусные землетрясения, для которых рассматриваются предвестники, выявленные по различным видам наблюдений. Пунктирной линией выделена территория Петропавловск-Камчатского полигона (ПКП).

Хаткевич, 1994; Kopylova, Boldina, 2020] проявлялись одновременно с развитием аномалий сейсмичности и увеличением горизонтального сжатия территории ПКП по данным светодальнометрических измерений.

Примеры комплексного проявления предвестников землетрясений 1987–2004 гг. в изменениях сейсмичности (параметр RTL , по [Кравченко, 2005; Соболев, 1999, 2003]), гидрогеологических параметров (уровень воды [Копылова, 2001]

Таблица 2. Землетрясения 2005–2022 гг. с $M_w \geq 6.6$, произошедшие в Камчатском регионе в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН ($\phi = 49^\circ 62'$ с.ш., $\lambda = 152^\circ 17'$ в.д.)

№ п/п	Дата	Время ч:мин:с	Широта, φ, град. с.ш.	Долгота, λ, град. в.д.	Глубина, км	Магнитуда* по NEIC	d_e^{**} , (d_h) км	M/lgd_h	Балл***, MSK-64	Примечание
1	20.04.2006	23:25:02	60.98	167.37	1	7.6 mwc	1025 (1025)	2.52	9 Корф [Олюторское ..., 2007], 8–9 Тилички; 6 Каменское; 5–6 Оссора; 4–5 Палана; 2 Усть-Камчатск	Олюторское ЗТ [Олюторское ..., 2007]
2	29.04.2006	16:58:06	60.54	167.76	0	6.6 mwc	1000 (1000)	2.20	5–6 Тилички; 3–4 Каменское; 3 Оссора	афтершок Олюторского ЗТ
3	22.05.2006	11:12:01	60.75	166.10	3	6.6 mwc	967 (967)	2.21	6–7 Тилички; 4–5 Оссора; 4 Каменское; 3–4 Палана	афтершок Олюторского ЗТ
4	05.07.2008	02:12:04	53.99	152.84	576	7.7 mwc	394 (698)	2.71	4 Усть-Камчатск; 3–5 ПТР; 3–4 Усть-Большерецк; 3 Елизово; 3 Вилючинск	Мантйное ЗТ с эпицентром в Охотском море
5	24.11.2008	09:02:59	53.77	154.69	564	7.3 mwc	270 (625)	2.61	3 ПТР	Мантйное ЗТ с эпицентром в Охотском море
6	28.02.2013	14:05:50	50.67	157.77	61	6.9 mww	263 (270)	2.85	5–6 Северо-Курильск; 4–5 Вилючинск, ПТР; 4 Елизово	ЗТ у южной оконечности полуострова Камчатка
7	24.05.2013	05:44:49	54.75	153.79	630	8.3 mww	368 (730)	2.90	5 ПТР; 4–5 Елизово, Вилючинск, Усть-Камчатск; 4 Мильково, Тигиль, Никольское; 3–4 Усть-Большерецк, Эссо, Палана; 3 Соболево; 2 Оссора	Мантйное Охотоморское ЗТ с эпицентром в Охотском море [Чебров и др., 2013б]
8	01.10.2013	03:38:22	52.88	153.34	608	6.7 mww	350 (700)	2.35	3 ПТР	афтершок Охотоморского ЗТ
9	30.01.2016	03:25:12	53.85	159.04	178	7.2 mww	98 (203)	3.12	4–5 Вилючинск, ПТР; 4 Елизово, Мильково, Усть-Камчатск; 2 Усть-Большерецк	Жупановское ЗТ [Чебров и др., 2016]
10	29.03.2017	04:09:24	56.97	163.22	43	6.6 mww	526 (528)	2.42	6 Усть-Камчатск; 3 Никольское, Тигиль, Палана	Южно-Озерновское ЗТ [Чебров и др., 2017в]

Таблица 2. Окончание

11	17.07.2017	23:34:14	54.35	168.90	7	7.7 mww	690 (691)	2.71	5–6 Никольское; 3 Усть-Камчатск; 2–3 ПТР	Ближне-Алеутское ЗТ [Чебров и др., 2017б]
12	13.10.2018	11:10:22	52.53	153.87	498	6.7 mww	320 (590)	2.42	3–4 Северо-Курильск; 2–3 ПТР	Мангитное ЗТ с эпицентром в Охотском море
13	20.12.2018	17:01:55	54.91	164.71	54	7.3 mww	450 (453)	2.75	5–6 Никольское; 4–5 Усть-Камчатск; 3–4 ПТР, Елизово; 3 Оссора; 2–3 Мильково	ЗТ Угловое поднятия [Чебров и др., 2020]
14	25.03.2020	02:49:21	49.11	158.08	48	7.5 mww	430 (433)	2.84	6–7 Северо-Курильск; 4–5 ПТР; 2–3 Никольское	Парамуширское ЗТ [Прытков, Василенко, 2021]
15	16.03.2021	18:38:21	54.64	163.35	64	6.6 mww	359 (364)	2.58	4–5 Усть-Камчатск; 4 Никольское; 3 ПТР; 2 Вилочинск	ЗТ в районе Кроноцкого п-ва

Примечание. См. примечание к табл. 1.

и химический состав подземной воды из скважин [Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004]), в укорачивании длин линий светодальномерных измерений [Бахтияров, Левин, 1989; Левин и др., 2006] и в изменениях высокочастотного сейсмического шума (ВСШ) в пункте “Начики” [Гордеев и др., 2006] представлены в работах [Копылова, Серафимова, 2004, 2009; Серафимова, Копылова, 2010]. На рис. 3 демонстрируется пример комплексного проявления предвестников перед землетрясением 2 марта 1992 г., $M_W = 6.9$.

Предвестники землетрясений 2005–2022 гг.

В 2005–2022 гг. в пределах Камчатской сеismoактивной области в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН (см. рис. 1а) произошли 15 землетрясений с магнитудами $M_W = 6.6–8.3$, вызвавшие в населенных пунктах Камчатского края сотрясения от 2 до 8–9 баллов по шкале MSK-64 (<http://sdis.emsd.ru>) [Чеброва и др., 2020]. На рис. 2 показано расположение эпицентров этих землетрясений, в табл. 2 представлены их параметры.

На рис. 2 и в табл. 2 показаны семь землетрясений, произошедших в диапазоне глубин $H = 7–178$ км, для которых представлены диаграммы с выявленными предвестниками и временами их проявления (рис. 4). Данные о предвестниках содержатся в работах по отдельным видам наблюдений, а также в работах с описанием землетрясений с $M_W \geq 6.6$, в которых, как правило, приводятся данные о предвестниках, выявленных в режиме реального времени или ретроспективно по материалам работ КФ РЭС и авторским данным [Болдина, Копылова, 2017; Сильные ..., 2014; Чебров и др., 2013а, 2013в, 2016, 2017а, 2017б, 2020]. Общая характеристика предвестников землетрясений и область их применения, а также библиография и примеры использования сейсмопрогностических методик для выделения предвестников наиболее подробно рассмотрены в работе [Чебров и др., 2011].

В группе *сейсмических* методов рассматривались семь видов предвестников.

1. Форшоковая активизация [Чебров и др., 2017б, 2020].

2. Обнаружение сейсмических затиший по методике *RTL* (“*RTL*”).

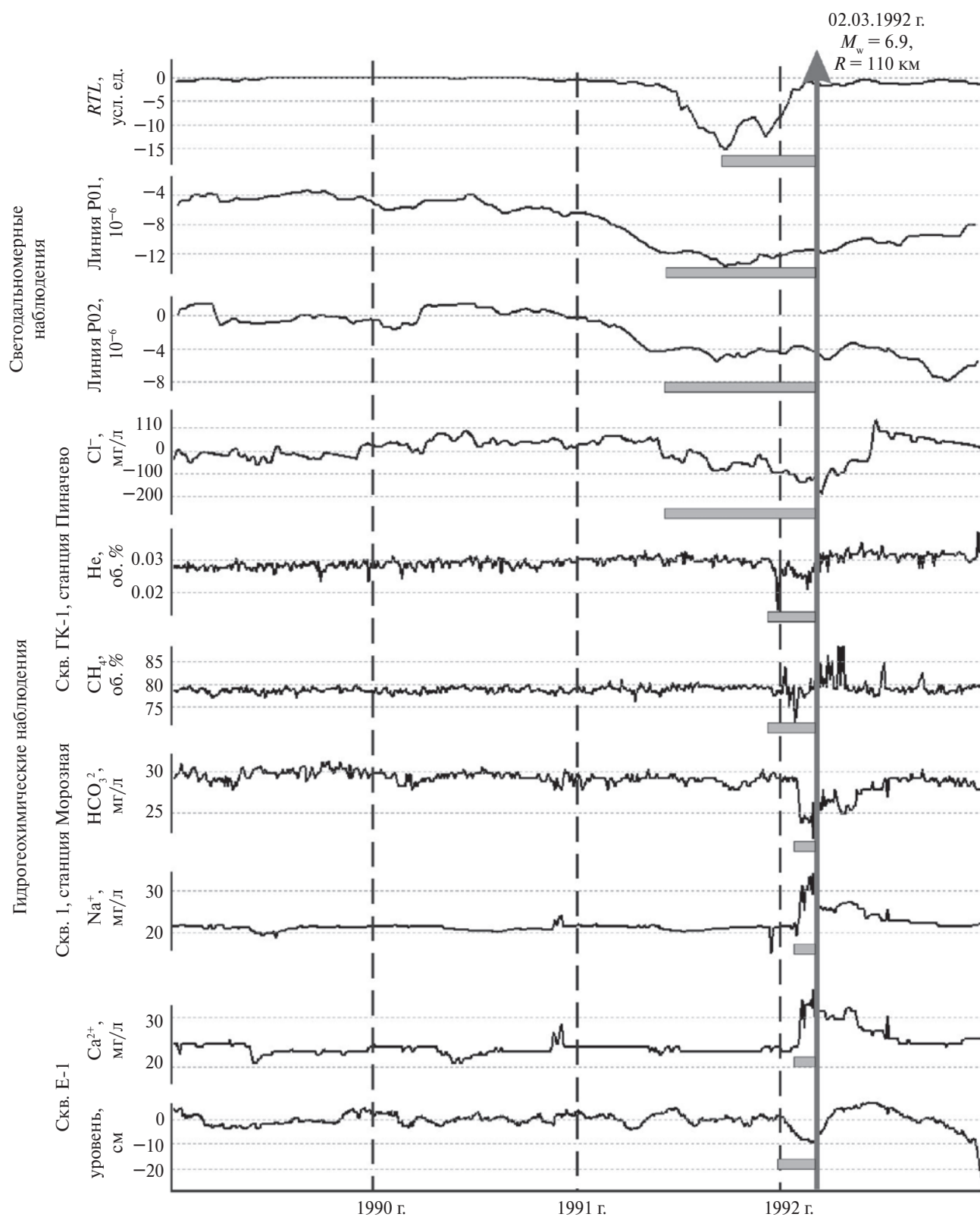


Рис. 3. Проявление предвестников перед землетрясением 2 марта 1992 г., $M_w = 6.9$.

R — расстояние до центра Петропавловск-Камчатского полигона. Горизонтальными серыми полосами показано время проявления предвестников [Серафимова, Копылова, 2010, рис. 2].

Прогностический параметр RTL основан на выделении аномалии сейсмического затишья по трем функциям: эпицентральной R , временной T и энергетической L , характеризующим сейсмический режим [Соболев, Тюпкин, 1996]; применяется для прогноза землетрясений с магнитудой более 6.0 [Салтыков и др., 2013; Чебров и др., 2011]. Пространственно-временные области с отрицательными значениями параметра RTL , равного произведению функций R , T и L , соответствуют зонам сейсмического затишья. В качестве прогностических признаков рассматриваются значения $RTL < -3$ длительностью не менее года. Ожидается, что землетрясение произойдет в окрестности такой аномалии в течение двух лет после выхода значений RTL на фоновые величины.

3. Обнаружение сейсмических затиший по методике Z -функции [Wyss, Habermann, 1988] (" Z -функция").

Рассматриваются и количественно оцениваются сейсмические затишья как статистически значимое уменьшение скорости потока землетрясений в ограниченном объеме среды. В качестве предвестников землетрясений рассматриваются области аномально низкой сейсмичности, в пределах которых или в ближайших их окрестностях в течение года возможно землетрясение с магнитудой не менее 6.0 [Салтыков и др., 2013; Чебров и др., 2011].

4. Вариации наклона графика повторяемости γ ("гамма").

Определяются пространственно-временные области статистически значимого уменьшения наклона графика повторяемости γ землетрясений. Ожидается, что землетрясение с магнитудой $M \geq 6.0$ произойдет в пределах области проявления значимых вариаций γ или на ее периферии [Салтыков и др., 2013].

5. Вариации отношения скоростей сейсмических волн V_p/V_s ("параметр τ "), по данным ИФЗ РАН.

Рассматриваются вариации времен пробега P - и S -волн от слабых близких землетрясений и их отношения T_s/T_p в пространстве и времени относительно долговременного среднего с выявлением пространственно-временных интервалов максимальных флуктуаций. Метод применяется для оценки изменений

напряженно-деформированного состояния среды в пределах Камчатской сейсмофокальной зоны, которые могут быть связаны с подготовкой землетрясений с $K_s \geq 12.5-13.0$ [Славина и др., 1993, 2004; Чебров и др., 2011].

6. Вариации параметров высокочастотного сейсмического шума (ВСШ), связанные с изменением приливного отклика среды перед сильными землетрясениями ("ВСШ").

Согласно этой оригинальной методике [Способ ..., 1998] при изучении вариаций сейсмической эмиссии в качестве эталонного сигнала используются земные приливы. При прогнозировании землетрясений в качестве информационного параметра рассматривается фазовый сдвиг между определенной волной приливного гравитационного потенциала и соответствующим ей компонентом огибающего ВСШ. Предвестник соответствует стабилизации фазового сдвига на некотором уровне в течение нескольких недель. Пороговые значения магнитуды ожидаемого землетрясения, начиная с величины $M \geq 5.0$, определяются соотношением магнитуда–расстояние [Салтыков, 2017; Чебров и др., 2011].

7. Вариации фонового сейсмического шума (ФСШ) по непрерывным записям на сети широкополосных сейсмических станций на территории п-ова Камчатка, Командорских островов и о. Парамушир, по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН и ИФЗ РАН.

Вариации ФСШ характеризуются временными рядами статистических параметров – обобщенным показателем Херста α^* , шириной носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$, вейвлетной спектральной экспонентой β , минимальной нормализованной энтропией вейвлет-коэффициентов шума En , определяемых ежесуточно для каждой станции сети за период наблюдений с 2011 г., и графиками изменения их медианных значений. Предвестниковые изменения параметров ФСШ проявляются за несколько месяцев – в первые годы до возникновения сильных землетрясений на картах в области их будущих очагов и на графиках их медианных значений в относительном уменьшении величин α^* , $\Delta\alpha$, β и в увеличении En [Касимова и др., 2018; Копылова и др., 2021; Любушин и др., 2015; Kopylova et al., 2022].

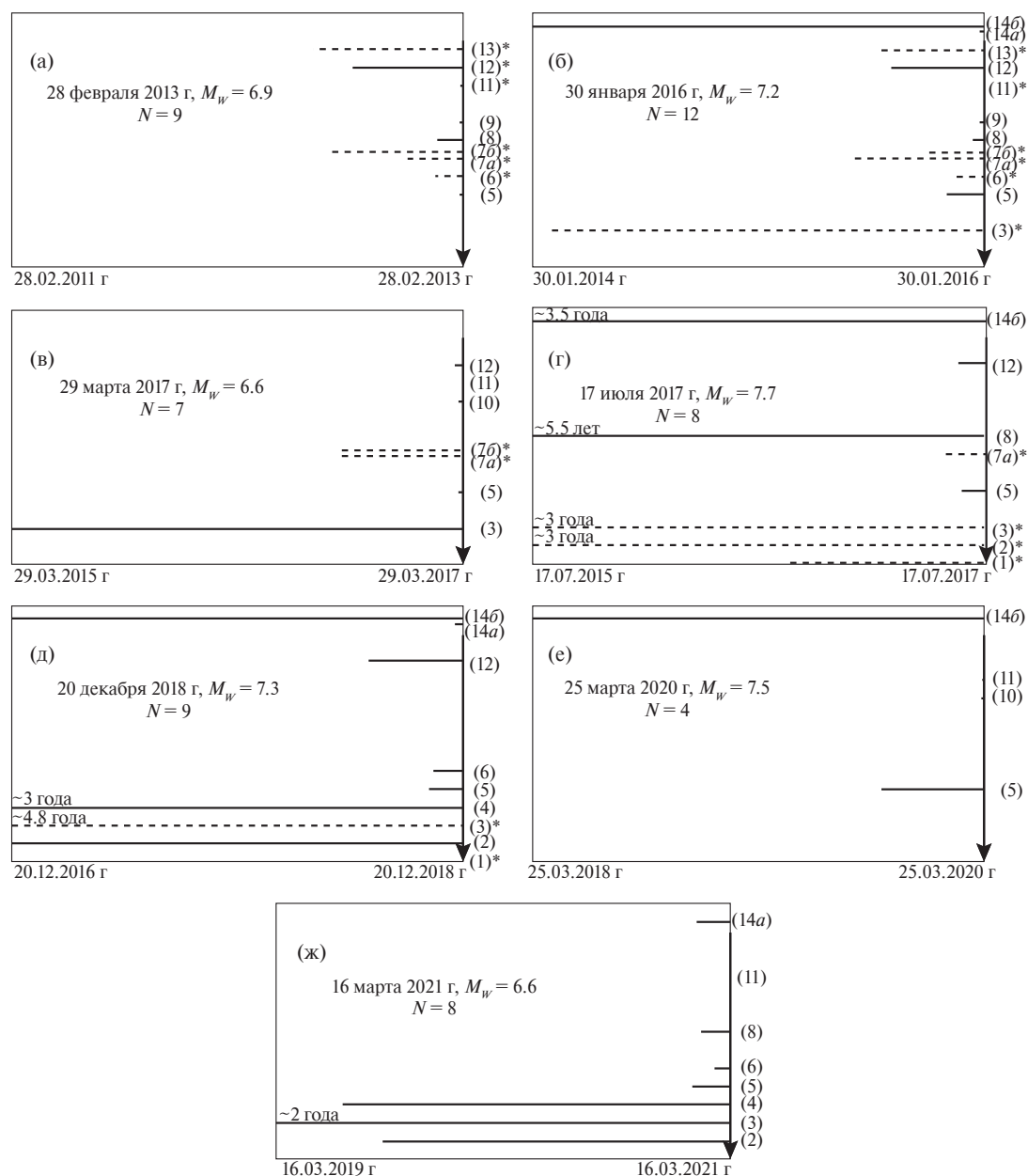


Рис. 4. Состав предвестников 1–14 и время их проявления перед семью мелко- и среднефокусными землетрясениями 2005–2022 гг. с $M \geq 6.6$ (см. табл. 2, рис. 2).

Горизонтальные оси соответствуют двум календарным годам, предшествующим землетрясениям; вертикальная стрелка – момент землетрясения; штриховыми горизонтальными линиями и звездочками отмечены предвестники, выявленные ретроспективно; сплошными горизонтальными линиями обозначены предвестники, выявленные в реальном времени.

1 – форшоковая активизация, 2 – “RTL”, 3 – “Z-функция”, 4 – “гамма”, 5 – “параметр τ ”, 6 – “ВСШ”, 7 – “ФСШ” (а – карты распределения статистических параметров, б – графики их медианных значений), 8 – гидрогеодинамические наблюдения в скважине Е-1, 9 – “ОНЧ”, 10 – “фазовый портрет”, 11 – ионосферные наблюдения, 12 – скважинные геоакустические наблюдения, 13 – гидрогеохимические наблюдения, 14 – “радон” (а – краткосрочный предвестник, б – длительный тренд (пояснения см. в тексте)).

(а)–(ж) – землетрясения (номера см. рис. 2, названия в табл. 2): (а) – № 6, ЗТ у южной оконечности п-ова Камчатка [Касимова и др., 2018; Сильные ..., 2014; Чебров и др., 2013а]; (б) – № 9, Жупановское [Болдина, Копылова, 2017; Гаврилов и др., 2017; Касимова и др., 2018; Коновалова, 2019; Копылова и др., 2017; Рябинин, 2022; Рябинин, Полетаев, 2021; Смирнов и др., 2017; Фирстов и др., 2017; Фирстов, Макаров, 2018; Чебров и др., 2016, 2017г]; (в) – № 10, Южно-Озерновское [Касимова и др., 2018; Коновалова, 2019; Чебров и др., 2017а, 2017г]; (г) – № 11, Ближне-Алеутское [Болдина и др., 2019; Копылова и др., 2019; Кравченко, Коновалова, 2019; Фирстов, Макаров, 2018, 2020; Чебров и др., 2017а, 2017б, 2017г]; (д) – № 13, Угловое поднятия [Коновалова, 2019; Фирстов, Макаров, 2020; Чебров и др., 2020]; (е) – № 14, Парамуширское [Копылова и др., 2021; Фирстов, Макаров, 2020; Чебров и др., 2021; Korylova et al., 2022]; (ж) – № 15, ЗТ в районе Кроноцкого п-ова [Болдина и др., 2022; Фирстов, Макаров, 2021; Чебров и др., 2021].

В группе *геофизических* методов рассматриваются пять видов предвестников.

8. Изменения уровня, температуры и электропроводности подземной воды в скважинах.

В скважине Е-1 обнаружены понижения уровня воды с повышенной скоростью, продолжительностью от суток до нескольких недель, предшествующие землетрясениям с магнитудами $M_w \geq 5.0$ на расстояниях до 370 км от скважины [Копылова, 2001; Копылова, Болдина, 2019; Чебров и др., 2011; Kopylova, Boldina, 2020].

Атмосферно-ионосферные параметры по данным наблюдений ИКИР ДВО РАН.

9. Наблюдения за электромагнитным ОНЧ-излучением (“ОНЧ”).

В шумовой составляющей естественного электромагнитного ОНЧ излучения за несколько суток до землетрясений с $M \geq 5.0$ появляются мощные импульсы, которые прекращаются за несколько часов или суток до события. Амплитуда суточного хода шумовой составляющей ОНЧ сигнала обычно понижается за несколько суток до землетрясения, а после сейсмического события в течение нескольких суток восстанавливается [Богданов и др., 2004; Дружин, 2002; Чебров и др., 2011].

10. Мониторинг вариаций геомагнитного и атмосферного электрического поля Земли (“фазовый портрет”).

Анализ фазовых соотношений между вертикальной составляющей электрического поля E_z и K -индексом геомагнитной активности показывает, что при синхронном достижении минимумов величинами E_z и K -индекса отмечается рост сейсмической активности и возникновение землетрясений с $K_s \geq 12.6$ [Богданов и др., 2004; Бузевич, Смирнов, 2001; Чебров и др., 2011].

11. Мониторинг параметров ионосферы (“ионосферные наблюдения”).

По результатам вертикального радиозондирования ионосферы обнаружены аномальные изменения критической частоты f_0F_2 регулярного слоя F_2 перед землетрясениями с $K_s \geq 13$ [Богданов и др., 2004; Чебров и др., 2011].

12. Мониторинг вариаций геоакустической эмиссии (ГАЭ) в скважине (“скважинные геоакустические измерения”), по данным ИВиС ДВО РАН.

Перед сильными землетрясениями наблюдаются исчезновение суточного хода и бухтообразные аномалии среднесуточного уровня ГАЭ [Гаврилов и др., 2006а, 2006б; Чебров и др., 2011; Gavrilov et al., 2020].

Также рассматриваются два *геохимических* метода.

13. Вариации химического состава подземной воды из самоизливающихся скважин (“гидро-геохимические наблюдения”).

В качестве предвестников землетрясений, для которых отношение $M_w/\lg d_h \geq 3.0$, рассматриваются аномальные изменения концентраций компонентов ионного состава воды и свободного газа [Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 2006; Чебров и др., 2011; Kopylova, Boldina, 2020, 2021].

14. Вариации объемной активности радона ^{222}Rn (ОА Rn) и концентраций водорода и углекислого газа в почвенном воздухе перед местными землетрясениями с $M \geq 5.0$ (“радон”) [Фирстов и др., 2006; Фирстов, Макаров, 2018; Чебров и др., 2011].

Кроме сравнительно кратковременных вариаций “радона”, в течение нескольких суток или недель, предшествующих местным землетрясениям с $M \geq 5.0$, в динамике ОА Rn проявляются длительные (1–3 года) тренды, которые рассматриваются в качестве предвестников землетрясений с $M > 7.5$ северо-западной окраины Тихого океана [Фирстов, Макаров, 2018].

Для семи мелко- и среднефокусных землетрясений 2005–2022 гг. определялся состав предвестников и время их проявления на основании опубликованных данных по перечисленным выше 14-ти сейсмопрогностическим методам. На диаграммах рис. 4 показаны моменты землетрясений и времена проявления отдельных предвестников на интервале времени два года до сейсмического события. Анализ этих диаграмм показывает, что перед некоторыми землетрясениями количество предвестников N варьирует от 4 до 12, а время их проявления составляло от первых суток до 2 лет и более (до ~5 лет). Из общего числа проявлений предвестников (57) 38 были выявлены в реальном времени ($38/57 \times 100\% = 66.7\%$). Для отдельных землетрясений отношение числа предвестников,

выявленных в реальном времени, к их общему числу N составило 44–100% (см. рис. 4).

Наименьшее число предвестников ($N = 4$) было зафиксировано перед Парамуширским землетрясением 25 марта 2020 г., $M_w = 7.5$ (№ 10 на рис. 1а и в табл. 1; № 14 на рис. 2 и в табл. 2), которое является “внешним” сейсмическим событием в Курило-Камчатской зоне субдукции. Очаг этого землетрясения находился под океаническим склоном глубоководного желоба в погружающейся Тихоокеанской океанической плите [Прытков, Василенко, 2021].

Другие рассматриваемые землетрясения, перед которыми число предвестников N составляло от 7 до 12, относятся к межплитовым (субдукционным) землетрясениям, возникающим при взаимодействии погружающейся Тихоокеанской океанической плиты с континентальными Охотоморской и Берингийской микроплитами (см. рис. 1а).

На рис. 5 показано соотношение между числом зарегистрированных предвестников N и параметрами последующих землетрясений – их магнитудами M_w и величинами $M_w/\lg d_h$. Оценка связи между числом предвестников N и параметрами землетрясений проводилась по величинам линейного коэффициента корреляции

Пирсона r и коэффициента ранговой корреляции Спирмена ρ [Большев, Смирнов, 1965].

Анализ графика на рис. 5а и величин $r = -0.11$ и $\rho = -0.02$ показывает отсутствие связи между числом проявившихся предвестников N и величинами магнитуд последующих землетрясений. Если использовать в качестве характеристики землетрясений параметр $M_w/\lg d_h$, то коэффициенты r и ρ увеличиваются до 0.47 и 0.61 соответственно (см. рис. 5в). При этом величины r и ρ также не являются статистически значимыми для набора из семи пар значений.

Аналогичные построения и расчеты коэффициентов r и ρ были выполнены для шести пар чисел предвестников N и параметров межплитовых землетрясений (см. рис. 5б, 5г), в этом случае данные по внутриплитовому Парамуширскому землетрясению были исключены. При сопоставлении числа предвестников N и величин магнитуд последующих землетрясений M_w (см. рис. 5б) получены статистически незначимые величины коэффициентов $r = 0.31$ и $\rho = 0.43$. При сравнении величин N и параметров землетрясений $M_w/\lg d_h$ (см. рис. 5г) получены коэффициенты $r = 0.96$ и $\rho = 0.97$, величины доверительных вероятностей которых для шести пар значений составляют 99.8% и 99.9%

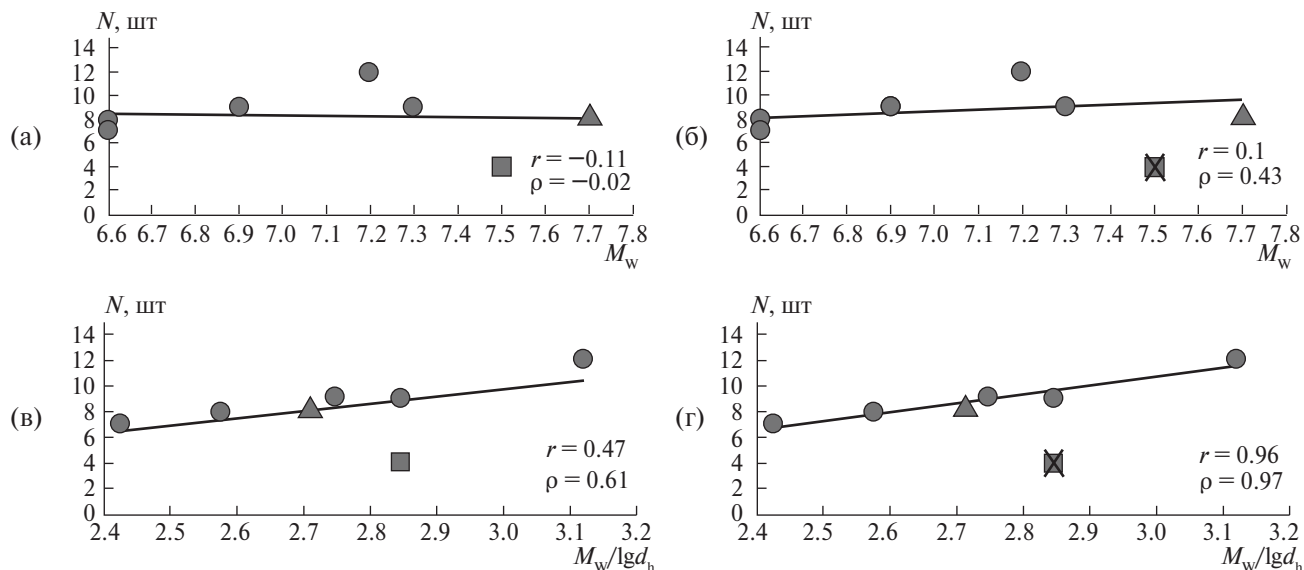


Рис. 5. Соотношение между числом предвестников N , проявившихся перед конкретным землетрясением по 14-ти рассматриваемым методам, и параметрами последующих землетрясений M_w (а, б) и $M_w/\lg d_h$ (в, г). r – коэффициент линейной корреляции Пирсона, ρ – коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Квадратом обозначено Парамуширское землетрясение (№ 10 на рис. 1 и в табл. 1; № 14 на рис. 2 и в табл. 2), треугольником – Ближне-Алеутское землетрясение (№ 9 на рис. 1 и в табл. 1, № 11 на рис. 2 и в табл. 2). Крестиком отмечены данные по внутриплитовому Парамуширскому землетрясению, не учитывавшиеся при расчетах (пояснения см. в тексте).

соответственно. Эти результаты указывают на отсутствие статистически значимой связи между числом предвестников и величинами магнитуд последующих землетрясений в диапазоне $M_w = 6.6–7.7$ и на наличие положительной связи между числом предвестников и параметром M_w/lgd_h для межплитовых землетрясений в Камчатской части Курило-Камчаткой островной дуги, включая Ближне-Алеутское землетрясение, произошедшее в зоне сочленения Курило-Камчаткой и Алеутской островных дуг.

Для шести землетрясений из семи рассматриваемых сейсмических событий величины параметра M_w/lgd_h составляют 2.42–2.85, менее 3 (см. рис. 5в), что обуславливается большой удаленностью их гипоцентров от территории ПКП ($d_h = 265–690$ км, см. табл. 2). Перед этими шестью землетрясениями количество предвестников N варьировало от четырех до девяти или 28–64% от общего числа рассматриваемых предвестников (см. рис. 4).

Для Жупановского землетрясения 30.01.2016 г. ($M_w = 7.2$) величина параметра $M_w/lgd_h = 3.12$. Перед этим землетрясением число предвестников было максимальным и составляло $N = 12$ из 14-ти рассматриваемых (86%). Ранее в работе [Чебров и др., 2016] указывалось на комплексное проявление предвестников перед этим сильным сейсмическим событием, произошедшем на минимальном расстоянии до центра ПКП (эпицентрального расстояние $d_e = 98$ км, см. табл. 2) в течение последнего десятилетия.

Ранее в работах [Копылова, Серафимова, 2009; Серафимова, Копылова, 2010] по данным наблюдений за предвестниками камчатских землетрясений 1987–2004 гг. было показано, что при существующей конфигурации наблюдательной сети, сосредоточенной, в основном, на территории ПКП, рост числа предвестников N является информативным признаком подготовки наиболее сильных и относительно “близких” землетрясений по отношению к территории полигона. Результаты анализа зависимости между числом предвестников N и параметром M_w/lgd_h для шести межплитовых землетрясений 2013–2020 гг. подтверждают этот вывод.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обнаружение роста числа различных видов предвестников наиболее сильных и близких к территории ПКП межплитовых землетрясений

1987–2022 гг., для которых параметр $M/lgd_h \geq 3.0$, является одним из наиболее важных результатов сейсмопрогностических исследований на территории п-ова Камчатка. Свойство комплексного проявления предвестников сильных и близких (к наблюдательной сети) землетрясений согласуется с ожидаемым эффектом проявления предвестников, который может найти применение при прогнозировании землетрясений при наличии ретроспективных оценок его связи с параметрами последующих землетрясений.

Эффект комплексного проявления предвестников сильных и наименее удаленных от территории ПКП землетрясений по данным 1987–2004 гг. подтвержден в настоящей работе на примере мелко- и среднефокусных межплитовых землетрясений 2005–2022 гг. Это позволяет объединить данные о проявлении предвестников и рассматривать ЭКПП в зависимости от параметров землетрясений за весь период проведения сейсмопрогностических исследований на Камчатке с использованием комплекса методов, принимая введенное выше ограничение ($\geq 80\%$) по проявлению предвестников перед конкретным землетрясением из их общего рассматриваемого числа. Общее число мелко- и среднефокусных землетрясений, предвестники которых анализировались в работе, составляет 18: 11 событий 1987–2004 гг. (табл. 3) и 7 событий 2005–2022 гг. (см. табл. 2).

Для периода 1987–2004 гг. принято, что общее число рассматриваемых предвестников составляет пять, для периода 2005–2022 гг. — 14. Отметим определенную условность этих чисел для указанных интервалов времени. Во-первых, отдельные виды наблюдений за предвестниками имели технические перерывы, когда данные перед некоторыми землетрясениями отсутствовали. В таких случаях принималось решение, что “предвестник не проявлялся”. Во-вторых, в работе использовались преимущественно опубликованные данные о предвестниках и можно было предполагать, что описание некоторых их видов перед отдельными из рассматриваемых землетрясений могли отсутствовать¹. Такая

¹ Исключение составляют предвестники: “ФСШ” (вариации фонового сейсмического шума) в 2011–2022 гг., изменения уровня воды в скважине Е-1 в 1987–2022 гг. и вариации химического состава воды из самоизливающихся скважин в 1987–1998 гг. Мониторинг этих видов предвестников, а также ведение баз данных наблюдений осуществлялись непосредственно авторами либо с их участием.

Таблица 3. Уточненные данные о мелко- и среднефокусных землетрясениях 1987–2004 гг. с $M_w \geq 6.6$, по [Серафимова, Копылова, 2010, табл. 1]

Дата	Время ч:мин:с	Широта, град. с.ш.	Долгота, град. в.д.	Глубина, км	d_h , км	M_w	$M/\lg d_h$	L , км	d_h/L	Баллы по шкале MSK-64
06.10.1987	20:11:36	52.86	160.23	33	115	6.5 6.6**	3.15 3.20	34 37	3.4 3.1	4–5 РЕТ
02.03.1992	12:29:39	52.76	160.20	20	110	6.9	3.38	50	2.2	5–6 РЕТ
08.06.1993	13:03:37	51.20	157.80	40	210	7.5	3.23	90	2.3	5 РЕТ
13.11.1993	01:18:07	51.79	158.83	40	140	7.0	3.26	55	2.5	5–6 РЕТ
01.01.1996	09:57:46	53.88	159.44	0	140	6.6	3.08	37	3.8	4–5 РЕТ
21.06.1996	13:57:06	51.27	159.63	2	203	6.7	2.90	41	5.0	3–5 РЕТ
05.12.1997	11:26:51	54.64	162.55	10	200*	7.8	3.39	121	1.6	5–6 РЕТ
08.03.1999	12:25:43	51.93	159.72	7	140	6.9	3.22	50	2.8	4–5 РЕТ
16.06.2003	22:08:02	55.30	160.34	190	340	6.9	2.73	50	6.8	3–4 РЕТ
05.12.2003	21:26:14	55.78	165.43	29	540	6.7	2.45	41	13.1	2–3 РЕТ
10.06.2004	15:19:55	55.68	160.25	208	377	6.9	2.68	50	7.6	3–4 РЕТ

Примечание. * – расстояние до центра очаговой области; ** – магнитуда M_s по данным Геофизической службы РАН [Зобин и др., 1990]; РЕТ – г. Петропавловск-Камчатский.

ситуация также соответствовала заключению “предвестник не проявлялся”.

Таким образом, авторская интерпретация двух возможных причин неполных исходных данных о предвестниках отдельных землетрясений понижает вероятность ошибки в выделении ЭКПП при повышении вероятности заключения, что ЭКПП перед этим землетрясением не проявлялся. С учетом предполагаемого прогностического значения ЭКПП используемый подход более точен в определении наличия либо отсутствия ЭКПП.

Для землетрясений 1987–2004 гг., перед которыми был выделен ЭКПП, использовались данные из работы [Серафимова, Копылова, 2010] (см. рис. 3, табл. 2). Уточненные параметры землетрясений с $M_w \geq 6.6$ для этого периода времени представлены в табл. 3. При этом два землетрясения из первоначального перечня были исключены из рассмотрения из-за понижения величин их магнитуды в актуальном каталоге USGS/NEIS (16.07.2016 г., $M_w = 6.5$, $d_h = 540$ км, и 01.06.1997 г., $M_w = 6.4$, $d_h = 120$ км).

Всего ЭКПП проявлялся перед семью землетрясениями: перед шестью землетрясениями 1987–2004 гг. и одним землетрясением 2005–2022 гг. Перед землетрясением 01.01.1996 г.

(см. табл. 3), по данным работы [Серафимова, Копылова, 2010], было зафиксировано всего три предвестника из пяти (60%). При этом данные равномерных наблюдений в скважине Е-1 в это время отсутствовали из-за технического перерыва. В более поздних работах [Копылова, Болдина, 2023; Kopylova, Boldina, 2020] было показано, что этому землетрясению предшествовало проявление гидрогеохимических предвестников в трех самоизливающихся скважинах на территории ПКП. На основании этих данных, а также проявлении трех видов предвестников в сейсмичности, ВСШ и химическом составе воды из скважины ГК-1, землетрясение 1 января 1996 г. было включено в число событий, которым предшествовал ЭКПП.

В табл. 4 представлены данные о землетрясениях, перед которыми проявлялся ЭКПП, с указанием для каждого из них величины магнитуды, доли проявившихся перед ним предвестников из рассматриваемого их числа (в %) и параметров d_h/L и $M/\lg d_h$, характеризующих интенсивность подготовки землетрясения в районе ПКП. Для этих землетрясений величины отношений составили $M/\lg d_h = 3.08–3.39$ и $d_h/L = 1.6–3.8$.

Таблица 4. Данные о землетрясениях района п-ова Камчатка, которым предшествовал эффект комплексного проявления предвестников (ЭКПП)

Дата	Магнитуда	Доля проявившихся предвестников от их общего числа, %	Параметры интенсивности подготовки землетрясения в районе ПКП	
			d_h/L	M/lgd_h
06.10.1987	6.5(6.6)	80	3.4(3.1)	3.15(3.20)
02.03.1992	6.9	100	2.2	3.38
08.06.1993	7.5	80	2.3	3.23
13.11.1993	7.0	80	2.5	3.26
01.01.1996	6.6	80*	3.8	3.08
05.12.1997	7.8	100	1.6	3.39
30.01.2016	7.2	86	3.0	3.12

Примечание. * – с учетом комплексного проявления гидрогеохимических предвестников в трех скважинах территории ПКП [Копылова, Болдина, 2023].

О соотношении между параметрами землетрясений M/lgd_h и d_h/L

На рис. 6 демонстрируется соотношение между параметрами M_w/lgd_h и d_h/L , характеризующими относительную интенсивность подготовки землетрясений в районе ПКП, для всех 18-ти рассматриваемых землетрясений. Анализ этого рисунка показывает линейную корреляцию между двумя используемыми в работе параметрами интенсивности подготовки землетрясений в районе ПКП при величине коэффициента корреляции Пирсона $r = -0.93$, значимого для 18 пар значений с доверительной вероятностью 99.9%. Это позволяет применять для предварительных выводов о параметрах землетрясений, перед которыми проявляется ЭКПП, обе рассматриваемые величины, а также показывает, что ЭКПП возникал перед семью из восьми землетрясений (88%), для которых величины $M_w/lgd_h = 3.08–3.39$ и $d_h/L = 1.6–3.8$. Исключение составляет землетрясение 8 марта 1999 г., $M_w = 7.0$ (см. табл. 3), параметры которого соответствуют указанному интервалу величин. Однако перед этим землетрясением проявился лишь один вид предвестника – изменение сейсмичности по параметру RTL . По другим четырем видам сейсмопрогностических наблюдений, а также по данным о химическом составе подземных вод из скважин ПКП аномалии-предвестники перед землетрясением 8 марта 1999 г. не наблюдались. Мы полагаем, что отсутствие предвестников

в изменениях гидрогеологических и других наблюдаемых параметров было обусловлено тем, что событие 8 марта 1999 г. произошло всего через 15 месяцев после наиболее сильного Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., когда еще продолжались постсейсмические деформационные процессы по данным GPS-наблюдений [Gordeev et al., 2004] и восстановление режимов функционирования наблюдательных скважин после сильного сейсмического воздействия.

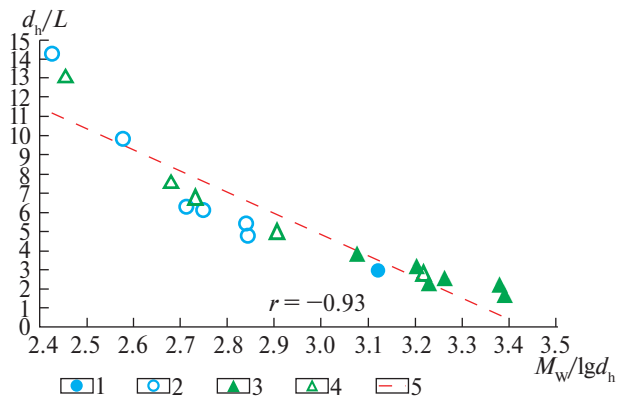


Рис. 6. Соотношение между параметрами землетрясений 1987–2022 гг. M_w/lgd_h и d_h/L с учетом наличия/отсутствия эффекта комплексного проявления предвестников. 1, 2 – проявление 14-ти видов предвестников перед землетрясениями 2005–2022 гг. при наличии и отсутствии ЭКПП соответственно; 3, 4 – проявление пяти видов предвестников перед землетрясениями 1987–2004 гг. при наличии и отсутствии ЭКПП соответственно; 5 – линейный тренд связи между M_w/lgd_h и d_h/L ; r – коэффициент корреляции Пирсона.

Несмотря на это исключение, полученные оценки параметров землетрясений $M_w/\lg d_h \geq 3.08$ и $d_h/L \leq 3.8$, перед которыми возникал ЭКПП, по данным специализированных наблюдений за предвестниками на Камчатке, могут найти применение для дальнейшего изучения ЭКПП и его использования в практике прогнозирования землетрясений в районе ПКП.

Обнаружение ЭКПП в режиме реального времени может указывать на подготовку землетрясения с $M_w \geq 6.6$ на расстояниях от ПКП не более нескольких (≤ 3.8) характерных размеров очага такого землетрясения. То есть в случае обнаружения ЭКПП можно полагать, что ПКП, а также Петропавловск-Елизовская агломерация находятся на сравнительно небольшом расстоянии от очага готовящегося сильного землетрясения, соответствующего его ближней – промежуточной (средней) зоне. Для оценки удаленности будущего землетрясения от ПКП (R , км) можно использовать модифицированную формулу расчета размера очага из работы [Завьялов, Зотов, 2021]: $R \leq 3.8 \times 10^{(0.43M - 1.27)}$.

Сопоставление ЭКПП с данными по отдельным видам предвестников

На рис. 7 показано соотношение между параметрами землетрясений M_w и d_h/L , перед которыми возникал ЭКПП, в сопоставлении с проявлениями четырех отдельных видов предвестников (ВСШ, уровень воды в скважине Е-1, акустические измерения в скважине Г-1, радон в почвенном воздухе) и теоретическими оценками зоны деформационных предвестников ($d_h = 10^{0.43M}$) по [Dobrovolsky et al., 1979], а также проявлениями гидрогеологических предвестников в нескольких ($n = 2-4$) скважинах на территории ПКП.

Приведенные на рис. 7 эмпирические оценки нижнего порога магнитуды прогнозируемого землетрясения M в диапазоне магнитуд 5.0–8.0 заимствованы из публикаций по трем видам предвестников: $M = -3.64 + 4.06 \lg d_e$ – ВСШ по данным станции “Начики”, где d_e – эпицентральное расстояние в км [Салтыков, 2017]; $M = 2.51 \lg d_h + 0.6$ – изменения уровня воды в скважине Е-1 [Копылова, 2001]; $\lg d_h = 0.36M - 0.04$ – изменения концентрации почвенного радона,

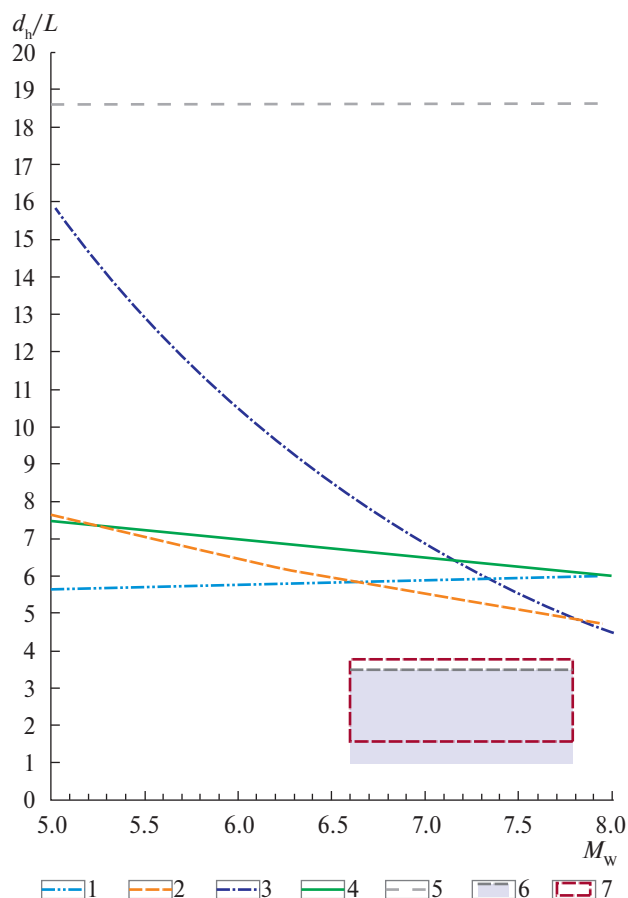


Рис. 7. Эффект комплексного проявления предвестников перед землетрясениями по данным наблюдений 1987–2022 гг. на Камчатке в зависимости от параметров землетрясений M_w и d_h/L в сравнении с проявлениями предвестников по четырём отдельным видам наблюдений, комплексным проявлением гидрогеологических предвестников и теоретической оценкой области деформационных предвестников. 1–4 – границы нижнего порога магнитуды прогнозируемого события по отдельным видам предвестников: 1 – скважинные геоакустические наблюдения [Gavrilov et al., 2020], 2 – радон в почвенном воздухе [Фирстов, Макаров, 2018], 3 – наблюдения высокочастотного сейсмического шума (ВСШ) на пункте “Начики” [Салтыков, 2017], 4 – уровень воды в скважине Е-1 [Копылова, 2001]; 5 – верхняя граница зоны деформационных предвестников по [Dobrovolsky et al., 1979]; 6 – проявление гидрогеологических предвестников в 2–4 скважинах Петропавловск-Камчатского полигона по [Копылова, Болдина, 2023; Kopylova, Boldina, 2020]; 7 – эффект комплексного проявления предвестников по данным настоящей работы.

зарегистрированные на территории ПКП [Фирстов, Макаров, 2018].

При построении указанных выше зависимостей для трех предвестников авторы соответствующих публикаций использовали величины магнитуд землетрясений из Регионального каталога землетрясений Камчатки (ВСШ, уровень воды

в скважине Е-1) и из каталога USGS/NEIS (“радон”). В формулах также указываются величины эпицентральных или гипоцентральных расстояний землетрясений для оценки удаленности землетрясений от наблюдательных пунктов. При построении зависимостей (см. рис. 7) полагалось, что такие различия в исходных параметрах землетрясений сравнительно невелики и ими можно пренебречь для предварительных оценок.

Для электромагнитных и геоакустических предвестников, зарегистрированных в скважине Г-1 в г. Петропавловск-Камчатский [Gavrilov et al., 2020] приводится зависимость их проявления от параметров землетрясений как $L^*/d_h \geq 0.19$, где размер очага $L^* = 10^{0.44M - 1.29}$. Здесь для расчета L^* авторами применялась формула расчета размера очага землетрясения из работы [Ризниченко, 1976]. Как показано в работе [Завьялов, Зотов, 2021, рис. 5], оценки размера очага землетрясения по величине магнитуды практически совпадают при использовании формул из работ [Ризниченко, 1976; Завьялов, Зотов, 2021]. Поэтому различия в размерах очагов землетрясений по двум формулам в случае этого вида предвестника также не учитывались (см. рис. 7).

В работах [Копылова, Болдина, 2023; Копылова, Болдина, 2020] даны количественные оценки проявления гидрогеологических предвестников в нескольких скважинах на территории ПКП в зависимости от параметров землетрясений $M_w = 6.6–7.8$ и $d_h/L^* = 1.0–3.6$. В случае этого вида предвестников расчет величин L^* также изначально проводился по формуле из работы [Ризниченко, 1976], которая, как отмечалось выше, дает сопоставимые величины размеров очагов землетрясений с оценками по формуле из работы [Завьялов, Зотов, 2021].

Как следует из анализа рис. 7, для событий с $M_w = 6.6–7.8$ приблизительные оценки пороговых величин d_h/L по четырем видам предвестников составляют 5.0–8.5, т.е. превышают максимальную величину $d_h/L = 3.8$, установленную в настоящей работе в качестве пороговой для ЭКПП. При этом эффект комплексного проявления гидрогеологических предвестников в нескольких скважинах на территории ПКП характеризуется значениями параметров землетрясений $M_w = 6.6–7.8$ и $d_h/L = 1.0–3.6$

[Копылова, Болдина, 2023; Kopylova, Boldina, 2020], которые сопоставимы со значениями этих параметров при проявлении ЭКПП (см. табл. 4).

Результаты анализа данных по четырем наиболее изученным видам предвестников, комплексному проявлению предвестников на Камчатке также показывают, что теоретические оценки верхней границы зоны деформационных предвестников, представленные в работах [Dobrovolsky et al., 1979; Сидорин, 1992], $d_h = 10^{0.48M}$, в 3–5 и до 10 раз превосходят область проявления ЭКПП, а также пороговые области проявления отдельных видов предвестников во всем рассматриваемом диапазоне магнитуд 5.0–8.0.

Практическим следствием этого результата исследования ЭКПП является возможность более точной корректировки района возникновения сильного ($M_w \geq 6.6$) землетрясения (значительного его уменьшения) на основе диагностики ЭКПП в режиме реального времени, по сравнению с использованием предвестников по отдельным видам наблюдений и теоретических оценок зоны проявления деформационных предвестников по [Dobrovolsky et al., 1979; Сидорин, 1992].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным комплексных сейсмопрогностических наблюдений, сосредоточенных, в основном, на территории Петропавловск-Камчатского полигона, расположенного в восточной части п-ова Камчатка, рассмотрены проявления предвестников перед восемнадцатью сильными мелко- и среднефокусными землетрясениями 1987–2022 гг. с $M_w = 6.6–7.8$.

Для периода 1987–2004 гг., с использованием данных о пяти видах предвестников (изменения сейсмичности, высокочастотного сейсмического шума, уровня и химического состава подземной воды, длин линий светодальномерных измерений), было показано, что в условиях имеющейся наблюдательной сети предвестники проявляются по комплексу методов перед землетрясениями, для которых величина $M_w/\lg d_h \geq 3.0$ [Серафимова, Копылова, 2010].

Для периода 2005–2022 гг. рассмотрены 14 видов сейсмических, геофизических и

геохимических предвестников перед семью мелко- и среднефокусными землетрясениями. Обнаружено, что число предвестников N , предшествующих отдельным землетрясениям, варьировало от 4 до 12 при отсутствии связи между N и магнитудой M_w последующего землетрясения.

Для межплитовых (субдукционных) землетрясений обнаружено увеличение числа предвестников N с ростом величины параметра землетрясений $M_w/\lg d_h$. Это подтвердило наличие выявленного ранее по данным 1987–2004 гг. эффекта комплексного проявления предвестников (ЭКПП) перед землетрясениями, наиболее сильными и близкими к территории полигона.

Для периода 1987–2022 гг. выполнено ретроспективное исследование ЭКПП, соответствующего проявлению не менее 80% предвестников из пяти их видов в 1987–2004 гг. и 14 видов предвестников в 2005–2022 гг. Показано, что ЭКПП проявлялся перед семью землетрясениями с $M_w = 6.6–7.8$, произошедшими на гипоцентральных расстояниях $d_h = 110–200$ км от Петропавловск-Камчатского полигона. Для таких землетрясений величины $M_w/\lg d_h = 3.08–3.39$, а величины отношения гипоцентрального расстояния к размеру очага землетрясения $d_h/L = 1.6–3.8$.

Полученные оценки параметров землетрясений, перед которыми фиксировался ЭКПП, могут быть полезными при средне- и краткосрочном прогнозировании сильного землетрясения в районе Петропавловск-Елизовской городской агломерации. Диагностика ЭКПП в режиме реального времени позволяет более надежно определить магнитуду ($M_w \geq 6.6$) и удаленность будущего сильного землетрясения по сравнению с использованием данных по отдельным методам сейсмопрогностических наблюдений и теоретической оценкой области деформационных предвестников по [Dobrovolsky et al., 1979; Сидорин, 1992]. Как показано в работе, отдельные виды предвестников и теоретические расчеты дают существенно завышенные оценки области подготовки сильного ($M_w \geq 6.6$) землетрясения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. А.Д. Завьялову, д.ф.-м.н. Г.Г. Кочаряну и к.ф.-м.н. А.В. Соломатину за обсуждение работы и полезные рекомендации, направленные на ее улучшение.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

В работе использованы данные, полученные на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<http://www.gsras.ru/unu>), развернутой при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 075-00682-24.

Работа выполнена по проекту РНФ № 22-17-00125.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахтияров В.Ф., Левин В.Е.* Деформации земной поверхности по данным круглогодичных светодальномерных наблюдений из обсерватории Мишенная, Камчатка, с 1979 по 1985 гг. // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 94–101.
- Богданов В.В., Бузевич А.В., Виницкий А.В. и др.* О влиянии солнечной активности на атмосферные и сейсмические процессы Камчатки // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН / Отв. ред. Е.И. Гордеев, В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 259–278.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н., Чубарова Е.Г.* Гидрогеодинамические эффекты сильных землетрясений 2017–2018 гг. // Труды Седьмой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 5 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 27–31.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н.* Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w = 7.2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 863–880.
- <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>

- Болдина С.В., Копылова Г.Н., Кобзев В.А.* Исследование эффектов землетрясений в изменениях давления подземных вод: аппаратура и некоторые результаты наблюдений в скважинах полуострова Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. С. 1–13.
<https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0594>
- Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.
- Бузевич А.В., Смирнов С.Э.* Метод прогноза камчатских землетрясений по вариациям геомагнитного и атмосферного электрического полей Земли на фоне гелиомагнитосферных процессов // I Российско-Японский семинар “Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений”, Хабаровск, 26–29 сентября 2000 г. / Под ред. Ф.Г. Корчагина. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. 285 с.
- Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В.* Успешный прогноз сильнейшего Жупановского землетрясения (30.01.2016 г., $M_w = 7.2$) на основе данных комплексных скважинных измерений // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 40–43.
- Гаврилов В.А., Власов Ю.А., Денисенко В.П. и др.* Опыт комплексных скважинных геофизических наблюдений в целях мониторинга состояния геосреды // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006а. № 2. Вып. 8. С. 44–53.
- Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В.* Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006б. № 1. С. 52–67.
- Гордеев Е.И., Пинегина Т.К., Ландер А.В., Кожурин А.И.* Беренгия: сейсмическая опасность и фундаментальные вопросы геотектоники // Физика Земли. 2015. № 4. С. 58–67.
<https://doi.org/10.7868/S0002333715030035>
- Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Предвестники камчатских землетрясений (по материалам Камчатского отделения Федерального центра прогнозирования землетрясений, 1998–2004 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 3–13.
- Гордеев Е.И., Федотов С.А., Чебров В.Н.* Детальные сейсмологические исследования на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 3–17.
- Гусев А.А.* О реальности 56-летнего цикла и повышенной вероятности сильных землетрясений в Петропавловске-Камчатском в 2008–2011 гг. согласно лунной цикличности // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 55–65.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34–42.
- Дружин Г.И.* Опыт прогноза Камчатских землетрясений на основе наблюдений за электромагнитным ОНЧ излучением // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 51–62.
- Завьялов А.Д., Зотов О.Д.* Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 22–29.
<https://doi.org/10.31857/S0203030621010065>
- Зобин В.М., Гордеев Е.И., Бахтияров В.Ф. и др.* Шипунское землетрясение 6 октября 1987 г. // Землетрясения в СССР в 1987 г. М.: Наука, 1990. С. 116–133.
- Касимова В.А., Копылова Г.Н., Любушин А.А.* Вариации параметров фонового сейсмического шума на стадиях подготовки сильных землетрясений в Камчатском регионе // Физика Земли. 2018. № 2. С. 81–95.
<https://doi.org/10.7868/S0002333718020072>
- Коновалова А.А.* Проявление сейсмических аномалий перед сильными землетрясениями Камчатки // Труды Седьмой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 5 октября 2019. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 277–281.
- Константинова Т.Г.* Поведение грунтов и зданий при сильных землетрясениях [Научное электронное издание: монография]. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. 188 с.
- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39–52.
- Копылова Г.Н.* О вероятностном среднесрочном прогнозе сильных землетрясений Камчатки и параметризации предвестников // Труды Четвертой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 382–386.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский: ООО “Камчатпресс”, 2019. 144 с.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Сейсмогидрогеологические эффекты как проявление триггерного воздействия землетрясений на подземные воды (на примере скважин Петропавловск-Камчатского полигона,

- полуостров Камчатка) // Физика Земли. 2023. № 3. С. 78–95.
<https://doi.org/10.31857/S0002333723030079>
- Копылова Г.Н., Болдина С.В., Полетаев В.А.* Гидрогеологические эффекты Жупановского землетрясения 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$ // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 49–53.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В., Серафимова Ю.К.* Предвестники землетрясений в изменениях ионного и газового состава подземных вод: обзор мировых данных // Геохимия. 2022. Т. 67. № 10. С. 921–941.
<https://doi.org/10.31857/S0016752522100053>
- Копылова Г.Н., Касимова В.А., Любушин А.А. и др.* Эффекты когерентности в изменениях параметров фонового сейсмического шума, Камчатка, 2011–2017 гг. // Труды Седьмой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 5 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 72–77.
- Копылова Г.Н., Любушин А.А., Таранова Л.Н.* Новая прогностическая технология анализа вариаций низкочастотного сейсмического шума (на примере районов Дальнего Востока России) // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 1. С. 75–91.
<https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.05>
- Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К.* О проявлении некоторых среднесрочных предвестников сильных ($M_w \geq 6.6$) землетрясений Камчатки 1987–2004 гг. // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 4. С. 17–33.
- Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К.* Процессы подготовки сильных ($M \geq 6.6$) землетрясений Камчатки 1987–1993 гг. по данным многолетних комплексных наблюдений // Вулканология и сейсмология. 2004. № 1. С. 55–61.
- Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М.* Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53–70.
- Кравченко Н.М.* Оценка эффективности прогностического параметра RTL // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2005. № 2. Вып. 6. С. 99–107.
- Кравченко Н.М., Коновалова А.А.* Аномалии сейсмического затишья перед Ближне-Алеутским землетрясением 17 июля 2017 г. // Труды Седьмой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 5 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 287–289.
- Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф. и др.* Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 54–67.
- Левина В.И., Митюшкина С.В., Ландер С.В., Чеброва А.Ю.* Сейсмичность Камчатского региона за период детальных сейсмологических наблюдений // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений / Под ред. Е.И. Гордеева, В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2012. С. 105–137.
- Любушин А.А., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Таранова Л.Н.* О свойствах поля низкочастотных шумов, зарегистрированных на Камчатской сети широкополосных сейсмических станций // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. 26. С. 20–36.
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.* Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.
- Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований / Отв. ред. В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. 290 с.
- Прытков А.С., Василенко Н.Ф.* Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г., $M_w = 7.5$ // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. № 2. С. 113–127.
<https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.2.113-120.121-127>
- Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
- Рябинин Г.В.* К вопросу о механизме изменения химического состава воды самоизливающихся скважин в условиях нестационарного режима (на примере скважины ГК-1, полуостров Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. № 4. Вып. 56. С. 75–89.
- Рябинин Г.В., Полетаев В.А.* Изменения ионно-солевого состава термоминеральных вод в связи с сильнейшими землетрясениями ($M_L \geq 7.0$) юго-востока полуострова Камчатка // Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием “Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов, Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 283–287.
- Салтыков В.А.* О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений // Физика Земли. 2017. № 2. С. 84–96.
<https://doi.org/10.7868/S0002333717010124>

- Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
- Салтыков В.А., Воронаев П.В. Подход к проблеме комплексирования при прогнозе землетрясений // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 174–178.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Коналова А.А. Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 65–84.
- Серафимова Ю.К., Копылова Г.Н. Среднесрочные предвестники сильных ($M \geq 6.6$) землетрясений Камчатки 1987–2004 гг.: ретроспективная оценка их информативности для прогноза // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 3–12.
- Салтыков В.А., Сеницына В.И., Чебров В.Н. Способ контроля напряженного состояния земной коры для прогноза сильных землетрясений: Патент РФ № 2105332 // Б.И. 1998. № 5.
- Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
- Сильные Камчатские землетрясения 1971 года / Под ред. С.А. Федотова. Владивосток: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1975. 157 с.
- Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. 252 с.
- Славина Л.Б., Мячкин В.В., Белянкин Г.А. Закономерности проявления во времени и пространстве кинематических предвестников землетрясений // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. 1993. № 1. С. 131–138.
- Славина Л.Б., Мячкин В.В., Левина В.И. Опыт применения кинематических предвестников сейсмического поля для прогнозов землетрясений на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 216–227.
- Смирнов С.Э., Бычков В.В., Корсунова Л.П., Хегай В.В. Ионосферные и аэроэлектрические аномалии перед камчатским землетрясением 30.01.2016 // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 185–189.
- Соболев Г.А. Сейсмические свойства внутренней и внешней зоны очага землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2003. № 2. С. 3–12.
- Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 63–72.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 64–74.
- Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г. и др. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–121.
- Фирстов П.П., Копылова Г.Н., Соломатин А.В., Серафимова Ю.К. О прогнозировании сильного землетрясения в районе полуострова Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4. Вып. 32. С. 106–114.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2018. 148 с.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О. Долговременные тренды подпочвенного радона на Камчатке как индикаторы подготовки землетрясений с $M > 7.5$ в северо-западном обрамлении Тихого океана // Геосистемы переходных зон. 2020. Т. 4. № 3. С. 270–288. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.270-278.279-287>
- Фирстов П.П., Макаров Е.О. Отклик в поле подпочвенных газов на подготовку землетрясения 16 марта 2021 г. с $M_w = 6.6$ (район Кроноцкого полуострова) // Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием “Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов”, Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 312–315.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П. Особенности динамики подпочвенных газов перед Жупановским землетрясением 30.01.2016 г. с $M = 7.2$ (Камчатка) // ДАН. 2017. Т. 472. № 4. С. 462–465.
- Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П. и др. О связи динамики подпочвенного радона (^{222}Rn) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле–августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 49–59.
- Хаткевич Ю.М. О возможности среднесрочного прогноза землетрясений интенсивностью свыше 5 баллов, проявляющихся в городе Петропавловске-Камчатском // Вулканология и сейсмология. 1994. № 1. С. 63–67.

- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН / Отв. ред. Е.И. Гордеев, В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 96–112.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 34–42.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 5–16.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др. Сильное землетрясение 28.02.2013 г. у юго-восточного побережья Камчатки с магнитудой $M_w = 6.8$ по данным оперативной обработки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013а. № 1. Вып. 21. С. 9–16.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др. Глубокое охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой $M_w = 8.3$ – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013б. № 1. Вып. 21. С. 17–24.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Опыт выявления предвестников сильных ($M \geq 6.0$) землетрясений на Камчатке в 1998–2011 гг. по материалам КФ РЭС // Вулканология и сейсмология. 2013в. № 1. С. 85–95.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др. Сильные землетрясения на Камчатке в 2016–2017 гг. // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017а. С. 89–96.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w = 7.8$ на границе Командорской сейсмической брешии // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017б. № 3. Вып. 35. С. 22–25.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др. Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с $M_w = 6.6$, $K_s = 15.0$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017в. № 3. Вып. 35. С. 7–21.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др. Землетрясение Углового поднятия 20 декабря 2018 г. $M_w = 7.3$ в зоне сочленения Камчатского и Алеутского океанических желобов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 1. Вып. 45. С. 100–117. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-1-45-100-117>
- Чебров Д.В., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. О деятельности Камчатского филиала Российского экспертного совета в 2014–2017 гг. // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 195–200.
- Чебров Д.В., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. О деятельности Камчатского филиала Российского экспертного совета в 2019–2021 гг. // Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием “Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов”, Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 316–322.
- Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
- Argus D.F., Gordon R.G. No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1 // Geophys. Res. Lett. 1991 V. 18. P. 2039–2042. <https://doi.org/10.1029/91GL01532>
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I. Estimation of the Size of Earthquake Preparation Zones // Pure Appl. Geophys. 1979. V. 117. P. 1025–1044.
- Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Deshcherevskii A.V. et al. Stress–Strain State Monitoring of the Geological Medium Based on The Multi-instrumental Measurements in Boreholes: Experience of Research at the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Testing Site (Kamchatka, Russia) // Pure Appl. Geophys. 2020. V. 177. P. 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>
- Gordeev E.I., Gusev A.A., Levin V.E. et al. Preliminary analysis of deformation at the Eurasia-Pacific-North America plate junction from GPS data // Geophys. J. Int. 2001. V. 147(1). P. 189–198.
- Kozhurin A.I. Active Faulting in the Kamchatsky Peninsula, Kamchatka-Aleutian Junction // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region / Eds J. Eichelberger, E. Gordeev, M. Kasahara, J. Lees. Washington, DC: American Geophysical Union, 2007. P. 107–116.

Kopylova G., Boldina S. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula // *Front. Earth Sci.* 2020. V. 8. № 576017.

<https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>

Kopylova G., Boldina S. Preseismic Groundwater Ion Content Variations: Observational Data in Flowing Wells of the Kamchatka Peninsula and Conceptual Model // *Minerals*. 2021. V. 11. № 7. P. 1–17.

<https://doi.org/10.3390/min11070731>

Kopylova G., Kasimova V., Lyubushin A., Boldina S. Variability in the Statistical Properties of Continuous Seismic Records on a Network of Stations and Strong Earthquakes: A Case Study from the Kamchatka Peninsula, 2011–2021 // *Appl. Sci.* 2022. V. 12 № 8658.

<https://doi.org/10.3390/app12178658>

Wyss M., Habermann R.E. Seismic quiescence precursory to a past and a future Kurile Island earthquake // *Pure and Applied Geophysics*. 1979. V. 117. Iss. 6. P. 1195–1211.

<https://doi.org/10.1007/bf00876215>

ON THE MANIFESTATION OF PRECURSORS OF STRONG EARTHQUAKES ($M_w \geq 6.6$) IN KAMCHATKA

G. N. Kopylova*, Yu. K. Serafimova, V. A. Kasimova

*Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

**e-mail: gala@emsd.ru*

A review of work on the search for earthquake precursors during the period of detailed seismological observations in the Kamchatka Peninsula in 1962–2022 is presented in comparison with the cumulative graph of seismic energy release and the most powerful earthquakes. A feature of the observation network for earthquake precursors is the location of most “non-seismological” types of observations in a small area of the Petropavlovsk-Kamchatsky test site (PKTS). Analysis of the 14 types of seismic, geophysical and geochemical precursors before seven 2005–2022 shallow and intermediate earthquakes with $M_w = 6.6–7.7$ showed an increase in the number of precursors N with an increase in the parameter $M_w/\lg d_h$ (d_h is the hypocentral distance to the center of PKTS in km), which characterizes the relative intensity of earthquake preparation in the PKTS area. Such a relationship between N and $M_w/\lg d_h$ traced for interplate (subduction) earthquakes in the Kamchatka fragment of the Kuril-Kamchatka Island arc as well as consistent with the manifestations of precursors in 1987–2004 and reflects the integrated manifestation of precursors before earthquakes that are the strongest and closest to the PKTS territory. Before such events, the effect of integrated manifestation of precursors (EIMP) was observed in no less than 80% of the precursors of all considered in this work. For such earthquakes, the ratio between the hypocentral distance d_h and the size of the earthquake source L (km) is $d_h/L = 3.8–1.6$, i.e., the manifestation of EIMP is characteristic of the near and middle (intermediate) zone of the future earthquake. Using the example of four separate types of precursors, it is shown that their threshold values $d_h/L = 5.0–8.5$ for events with $M_w \geq 6.6$. If, during seismic forecasting, the EIMP is diagnosed in real time, then using the threshold value $d_h/L \leq 3.8$ set for it, it is possible to significantly reduce the estimate of the distance of a future strong earthquake from the PKTS area and the Petropavlovsk-Yelizovo urban agglomeration, compared with the use of data on individual types of precursors.

Keywords: earthquakes, precursors, magnitude, earthquake forecast, Kamchatka

УДК 550.34

КОММЕНТАРИИ К СТАТЬЕ Г. Н. КОПЫЛОВОЙ, Ю. К. СЕРАФИМОВОЙ, В. А. КАСИМОВОЙ “О ПРОЯВЛЕНИИ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ($M_w \geq 6.6$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ”

© 2025 г. В. А. Салтыков

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
“Единая геофизическая служба Российской академии наук”,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия
e-mail: salt@emsd.ru*

Поступила в редакцию 07.02.2025 г.
После доработки 17.02.2025 г.
Принята к публикации 18.02.2025 г.

Проблема комплексирования прогнозов, полученных по независимым методикам и различным входным данным, является актуальной для деятельности структур, занимающихся анализом прогнозов сильных землетрясений. Конечно, в идеальном варианте, когда мы рассматриваем некоторое множество прогнозов для одной пространственно-временной области, при этом эффективности используемых прогностических методик известны, решение задачи комплексирования прогнозов не составляет особого труда. В жизни, естественно, так не бывает. Поэтому сама по себе проблематика статьи очень интересна и важна.

Концепция комплексного предвестника, представленная в статье Г.Н. Копыловой с соавторами, не нова — авторы выдвинули ее более 10 лет назад. Эффект комплексного проявления предвестников (ЭКПП) представляется как увеличение числа предвестниковых аномалий по различным методикам. Предполагается, что этот эффект можно обнаружить в режиме реального времени. Ряд положений статьи вызывает возражения, которые оформлены в виде отдельных комментариев. Комментарии выстроены по ранжиру их важности с точки зрения комментатора.

КОММЕНТАРИЙ 1

Представляется, что авторы построили логику методики таким образом, что обязательным моментом возникновения ЭКПП является проявление гидрогеологических предвестников в 2–4 скважинах Петропавловск-Камчатского полигона.

Логично, что зона проявления ЭКПП [Копылова и др., 2025, рис. 7] не может выходить за пределы зон проявления отдельных предвестников, ее образующих. То есть работает принцип “слабого звена”: зона ЭКПП — есть пересечение зон компонент. Поскольку зона проявления гидрогеологических предвестников (тонированный прямоугольник на рис. 7, см. работу [Копылова и др., 2025]) существенно меньше аналогичных зон других предвестников [Копылова и др., 2025, рис. 7], и, учитывая их относительно большой вклад (отмеченное авторами количество — 2–4) в необходимое общее число предвестников, наличие/отсутствие гидрогеологических предвестников является чувствительным для констатации самого факта появления ЭКПП. В противном случае зона ЭКПП не совпадала бы с зоной проявления гидрогеологических предвестников. И тогда необходимым условием поиска ЭКПП является наличие гидрогеологических предвестников, дополненное какими-нибудь еще до их

заданного суммарного числа. И здесь важным становится то, что в целях прогноза рассматривается пространственно-энергетическая область ожидаемого землетрясения, существенно меньшая, чем области, характерные для каждого из негидрогеологических предвестников, судя по тому же рис. 7 (см. [Копылова и др., 2025]). Неизбежным при этом является значительное снижение индивидуальной эффективности каждого из прогностических методов (кроме гидрогеологического), что приведет к большому числу пропусков цели. Это подтверждает пропорция между числом залитых и незалитых элементов на рис. 6 в статье [Копылова и др., 2025], который также приведен в данной работе (рис. 1б).

КОММЕНТАРИЙ 2

Комментарий касается состава предвестников [Копылова и др., 2025, рис. 4] и в более широком смысле — случайности/неслучайности их появления и появления ЭКПП. Авторы работы [Копылова и др., 2025, рис. 4] отмечают продолжительность предвестников. Из-за названия рисунка “Состав предвестников и время их проявления...” и календарной маркировки оси у читателя легко может сложиться впечатление, что в течение 2 лет перед рассматриваемыми землетрясениями предвестники наблюдались лишь единожды, непосредственно перед землетрясением. Это не так.

Поскольку среди упомянутых авторами есть методика ВСШ [Салтыков, 2017], использующая эффект приливной модуляции высокочастотного сейсмического шума во время подготовки сильного землетрясения, удобно использовать именно ее в контексте комментария в качестве примера.

Согласно данным, приведенным в статье [Салтыков, 2017], с 28.02.2011 г. по 28.02.2013 г. (для интервала времени, относящегося к рис. 4а из работы [Копылова и др., 2025]) предвестник выявлен перед шестью землетрясениями, соответствующими ограничениям методики. При этом были и ложные тревоги, и пропуски цели (последние здесь не представляют интереса). Суммарное время тревоги в течение двух лет оценивается в среднем как $T_{\text{alarm}} = 160\text{--}220$ сут в зависимости от нижнего предела магнитуды

прогнозируемого землетрясения. То есть в течение $\sim 1/4$ всего времени отмечается состояние тревоги. Похожая на качественном уровне ситуация, вероятно, наблюдается и для предвестников, определяемых по другим методикам.

И здесь возникает вопрос: а как часто рассмотренные авторами 14 типов предвестников формируют ЭКПП случайным образом? Пока не будет дана хоть какая-нибудь оценка суммарной длительности тревоги, на основании которой можно определить эффективность комплексного предвестника, результаты статьи не представляют интереса для внедрения.

КОММЕНТАРИЙ 3

На рис. 4 из работы [Копылова и др., 2025] (а значит, это используется при построении комплексного предвестника) авторы приводят не только краткосрочные предвестники с определенным соотношением магнитуда–расстояние, но и среднесрочные предвестники, связанные с сейсмическими затишьями, вариациями наклона графика повторяемости и др., которые представляются пятнами различных размеров и форм на карте. В радиусе $d = 200\text{--}400$ км (что соответствует, согласно выводам статьи, зоне подготовки землетрясения $M = 7.0\text{--}7.5$) вокруг г. Петропавловска-Камчатского всегда (или почти всегда) найдется несколько таких пространственно разнесенных среднесрочных аномалий с размером, существенно меньшим d . То есть в любой момент времени в переменном комплексе предвестников всегда есть несколько постоянных членов (разумеется, конкретные аномалии меняются, но наличие некоторых типов предвестников — постоянно). Дополнительно можно заметить, что пространственные пятна среднесрочных аномалий могут рассекаются границей рассматриваемой области. В статье ни слова не говорится о том, как технически такие предвестники должны учитываться в комплексном параметре. И это тоже обесценивает работу.

Разумеется, при ретроспективном анализе этой проблемы нет: к конкретному землетрясению аномалия привязывается однозначно

по положению очага (который, как правило, находится на ее краю).

КОММЕНТАРИЙ 4

Согласно статье, информативным параметром является само число предвестников, имеющих в наличии. Надежность и эффективность отдельных типов предвестников существенно различаются. Но эта информация теряется при суммировании в штуках. Практически это означает, что авторы постулируют равенство эффективности¹ различных типов предвестников (что, наверно, естественно на начальном этапе разработки). Однако неясно, к каким искажениям результата приведет такое уравнивание.

КОММЕНТАРИЙ 5

Комментарий касается отдельных процедур и решений, принятых авторами в ходе работы. Они связаны с удалением из рассмотрения некоторых землетрясений, формально соответствующих условиям, и, напротив, включением в рассмотрение землетрясений, не соответствующих начальным условиям.

Рассматриваемое землетрясение 06.10.1987 г. имеет моментную магнитуду $M_w = 6.5$ (см. табл. 3, 4 из работы [Копылова и др., 2025]), хотя упомянуто, что рассматриваются землетрясения с $M_w \geq 6.6$. Причем землетрясение 16.07.2016 г. $M_w = 6.5$ было исключено из рассмотрения именно из-за коррекции магнитуды в каталоге. Очевидно, что подобная исключительность далеко не безобидна. Особенно критичной ситуация станет при необходимости расчета эффективности комплексного предвестника.

Неубедительной представляется причина удаления из рассмотрения (см. рис. 5 из работы [Копылова и др., 2025]) Парамуширского землетрясения 25.03.2020 г. $M_w = 7.4$, на том основании, что оно является внутриплитовым (эпицентр — за желобом). Последнее, конечно,

¹ Подразумевается эффективность по Гусеву [Гусев, 1974]. Но при равных эффективностях по Гусеву надежность предвестника (отношение числа землетрясений с предвестником к общему числу землетрясений) и достоверность предвестника (отношение числа реализованных аномалий к общему числу аномалий) могут существенно различаться. Это отражается, в частности, на числе ложных тревог и пропусков цели. На диаграммах Молчана [Molchan, 1990] это хорошо демонстрируется положением предвестника.

верно, но, во-первых, это землетрясение произошло в непосредственной близости к зоне субдукции Курило-Камчатской дуги, оно связывается с искривлением погружающейся Тихоокеанской плиты, и его взбросовый механизм соответствует механизму большинства сильных землетрясений зоны субдукции; во-вторых, не исключенное из рассмотрения Землетрясение Углового Поднятия 20.12.2018 г. ($M_w = 7.3$) также произошло за желобом — на внешней океанической стороне Камчатского и Алеутского желобов в районе их сочленения, а это нечастая трещина растяжения; в-третьих, оставшиеся межплитовые землетрясения отличаются большим разнообразием: приуроченность к совершенно разным тектоническим структурам (зона субдукции на различных глубинах до 180 км, граница малых литосферных плит: Охотской и Берингии, граница Командорской микроплиты и Берингии), весь спектр механизмов очага (см. рис. 2, литературу, указанную в табл. 2 из работы [Копылова и др., 2025]). На этом фоне исключение землетрясения выглядит как проявление волюнтаризма.

КОММЕНТАРИЙ 6

Вызывает недоумение раздел статьи, посвященный изучению взаимосвязи двух параметров — d/L и $M/\lg d$ (см. рис. 6 из работы [Копылова и др., 2025] и рис. 1 в данной работе). По сути, каждый из них есть комбинация расстояния d и магнитуды M , с учетом заложенного соотношения размера очага L и магнитуды M : $\lg L = 0.43M - 1.27$. Но тогда связь $d/L = Y$ и $M/\lg d = X$ — функциональная, но никак не статистическая, и методы выявления этой связи должны выбираться соответствующими. Учитывая, что X и Y определяются двумя параметрами, то, в общем случае, связь X и Y должна включать еще один параметр, например M . На рис. 1а представлено семейство функций для набора магнитуд M от 6.5 до 7.7 в диапазоне значений X и Y , соответствующем рис. 6 из работы [Копылова и др., 2025]. Кажущийся “статистический” разброс точек на рис. 6 из работы [Копылова и др., 2025] обусловлен только лишь их нахождением на различных кривых (см. рис. 1) в соответствии с их магнитудой.

Здесь же следует заметить, что линейная регрессия (см. рис. 6 из работы [Копылова и др.,

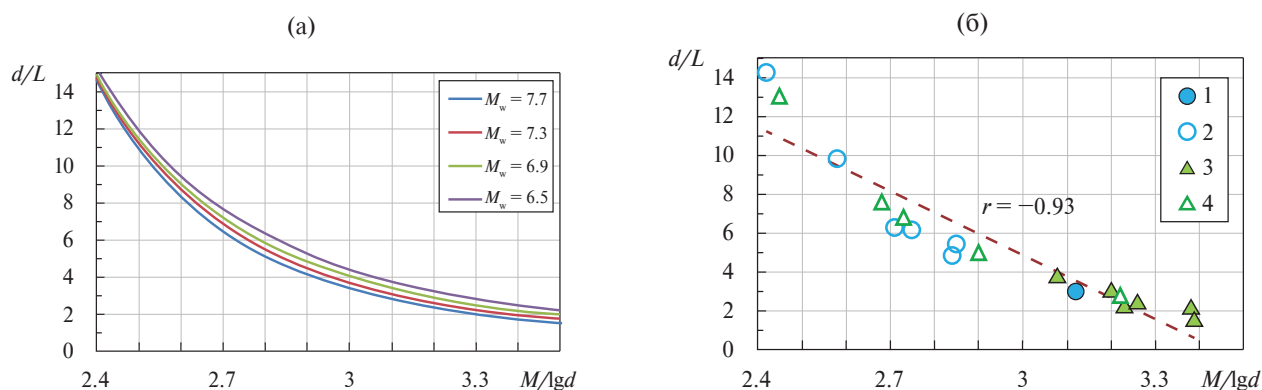


Рис. 1. Соотношение между параметрами землетрясений M/lgd и d/L .

(a) — функциональная зависимость d/L от M/lgd для набора магнитуд; (б) — реконструкция рис. 6 из статьи [Копылова и др., 2025] в соответствии с приведенными в ней (табл. 2, 3) данными. Элементы с заливкой соответствуют землетрясениям с ЭКПП, без заливки — без ЭКПП.

2025]), очевидно, неприменима для этого случая: различие знаков ошибки аппроксимации на краях диапазона и в центре говорит о нелинейной связи и необходимости нелинейной аппроксимации. Причем высокая значимость отрицательной корреляции, на что указывают авторы, предопределена самими параметрами X и Y : с увеличением магнитуды M (а значит, и размера очага L) и с уменьшением гипоцентрального расстояния d параметр X монотонно растет, а параметр Y так же монотонно убывает.

РЕЗЮМЕ

Следует признать, что авторы не привели в статье убедительных доказательств работоспособности методики ЭКПП: 1) не показана эффективность нового предвестника; 2) из самого построения комплексного предвестника следует уменьшение эффективности входящих в него компонент за счет уменьшенной зоны проявления ЭКПП по сравнению с зонами отдельных предвестников, что с неизбежностью ведет к увеличению пропусков цели; 3) неясен алгоритм использования в реальном времени.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075—00604—25, НИР № 122041500003—8 “Комплексное исследование предвестников сильных землетрясений и развитие методик прогнозирования сейсмической обстановки на Камчатке”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109—119.
- Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К., Касимова В.А. О проявлении предвестников сильных ($M_w \geq 6.6$) землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2025. № 2. С.
- Салтыков В.А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений // Физика Земли. 2017. № 2. С. 84—96. <https://doi.org/10.7868/S0002333717010124>
- Molchan G.M. Strategies in strong earthquake prediction // Phys. Earth and Planet. Inter. 1990. V. 61. P. 84—98.

COMMENTS ON THE ARTICLE BY G. N. KOPYLOVA, YU. K. SERAFIMOVA, V. A. KASIMOVA “ON THE MANIFESTATION OF PRECURSORS OF STRONG ($M_w \geq 6.6$) EARTHQUAKES IN KAMCHATKA”

V. A. Saltykov

Kamchatka Branch of the Federal Research Center United Geophysical Service
of the Russian Academy of Sciences,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia
e-mail: salt@emsd.ru