



CLARIFICATION OF THE NATURE OF TYPICAL PRECURSOR ANOMALIES FOR DIFFERENT-DEPTH EARTHQUAKES IN THE KURIL-KAMCHATKA REGION

M.V. Rodkin ^{1,2}, M.Yu. Andreeva ²✉

¹ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, 84-32 Profsoyuznaya St, Moscow 117997, Russia

² Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1B Nauki St, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

ABSTRACT. The task was set on investigation of the possibility of constructing a new algorithm for earthquake prediction based on a set of precursor effects that had been reliably identified from the world data as a result of constructing the generalized vicinity of a strong earthquake from a scaled combination of the data on a large number of foreshock and aftershock areas of individual strong earthquakes. In relation to the Kamchatka-Northern Kurils region, the first-stage solution of this task lies in clarification of the regional character of the averaged precursor effects on the basis of the most complete and homogeneous regional catalogue. There has been a later onset of anomalous changes in the intensity of flow of events and in the slope of the recurrence diagram for intermediate-depth earthquakes. The deep-seated earthquakes show a dominant trend of increased rather than decreased depth of weak events in the vicinity of strong events. The specified features of the averaged precursor behavior will be used as typical patterns to predict different-depth earthquakes in the Kuril-Kamchatka region.

KEYWORDS: aftershock and foreshock anomalies; earthquake prediction; physics of earthquake faulting

FUNDING: The work was carried out as part of the state assignment of the IMGG FEB RAS and with the support of the Russian Science Foundation (project 23-27-00395 "Complex anomalies in the generalized vicinity of a strong earthquake; physics of the process and use for forecasting purposes").



EDN: MUEBPV

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Marina Yu. Andreeva, andreeva-mu@mail.ru

Received: July 27, 2024

Revised: December 4, 2024

Accepted: December 13, 2024

FOR CITATION: Rodkin M.V., Andreeva M.Yu., 2025. Clarification of the Nature of Typical Precursor Anomalies for Different-Depth Earthquakes in the Kuril-Kamchatka Region. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (1), 0811. doi:10.5800/GT-2025-16-1-0811

УТОЧНЕНИЕ ХАРАКТЕРА ТИПОВЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВЫХ АНОМАЛИЙ ДЛЯ РАЗНОГЛУБИННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

М.В. Родкин^{1,2}, М.Ю. Андреева²

¹ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, Россия

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия

АННОТАЦИЯ. Ставится задача исследования возможности построения нового алгоритма прогноза землетрясений на основе набора предвестниковых эффектов, ранее надежно выявленных по мировым данным в результате построения обобщенной окрестности сильного землетрясения, сформированной масштабированным объединением данных по большому числу фор- и афтершоковых областей отдельных сильных землетрясений. Применительно к региону Камчатка – Северные Курилы решение этой задачи на первом этапе предусматривает уточнение регионального характера осредненных предвестниковых эффектов на основе наиболее полного и однородного регионального каталога. Отмечено более позднее начало аномалий изменения интенсивности потока событий и наклона графика повторяемости для среднеглубоких землетрясений. Для глубоких землетрясений доминирует тенденция не уменьшения, а увеличения глубины слабых событий в окрестности сильных. Уточненные особенности осредненного предвестникового поведения будут использованы как типовые паттерны для прогноза разноглубинных землетрясений Курило-Камчатского региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: афтершоковые и форшоковые аномалии; прогноз землетрясений, физика сейсмического разрушения

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена по программе госзадания ИМГиГ ДВО РАН и при поддержке РФ (проект № 23-27-00395 «Комплекс аномалий в обобщенной окрестности сильного землетрясения; физика процесса и использование в целях прогноза»).

1. ВВЕДЕНИЕ

Разными авторами было предложено и обсуждалось большое число разных методов прогноза землетрясений [Sobolev, 1993; Kagan, Jackson, 2000; Sobolev, Ponomarev, 2003; Zavyalov, 2006; Jordan et al., 2011; Kossobokov, Soloviev, 2015; и многие другие]. Наиболее удачные из них, как показано опытом их применения в реальном времени [Jordan et al., 2011; Kossobokov, Soloviev, 2015; Kossobokov, Shchepalina, 2020], обеспечивают прогноз много лучше случайного угадывания, но точности этих прогнозов недостаточно, чтобы потери при ошибочном прогнозе заведомо превышали объемы предупрежденного ущерба. Даже лучшие методы прогноза дают большое число как ложных тревог, так и ошибок пропуска цели. Достаточно распространена и точка зрения о принципиальной невозможности прогноза [Geller et al., 1997]. Отсюда, как и указывалось в резолюциях ряда международных симпозиумов, очевидна актуальность как исследования принципиальной возможности прогноза, так и улучшения алгоритмов прогноза и разработки новых подходов к прогнозу землетрясений.

Принято полагать, что препятствием на этом пути является как сильная изменчивость сейсмического режима, что затрудняет выявление устойчивых прогнозных признаков, так и отсутствие достаточно развитой физической модели сейсмического процесса. Отметим, что физический механизм сейсмического разрушения не может быть одинаковым для разноглубинных землетрясений; отсюда естественно ожидать,

что различию физических механизмов может отвечать и различие в характере прогнозных эффектов. По обоим этим направлениям в последнее время были получены новые результаты. Ниже кратко описываются эти результаты в плане возможности их применения для прогноза землетрясений.

2. МЕТОДИКА

Данная публикация является естественным продолжением серии работ [Rodkin, 2008, 2012, 2020; Rodkin, Tikhonov, 2016; и др.], посвященных проблемам построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ). В этих работах было показано, что при масштабированном на размер очага суммировании информации по окрестностям большого числа (сотни, до тысячи) отдельных сильных землетрясений удается получать вполне четкие образы средних прогнозных аномалий. В зависимости от того, насколько подробно и разносторонне описывается в каталоге каждое конкретное землетрясение, число таких прогнозных аномалий меняется. В наиболее простом и распространенном случае, когда событие в каталоге характеризуется положением гипоцентра, временем и одним значением магнитуды, выявляются две или три аномалии. Две из них отвечают известным и часто используемым (но иногда по-прежнему оспариваемым) аномалиям. Это форшоковый степенной рост числа слабых событий и изменение наклона графика

повторяемости. Вторая аномалия – уменьшение наклона графика повторяемости b -value – эквивалентна [Aki, 1965] изменениям среднего значения магнитуды (для событий $M > M_c$, где M_c – пороговое значение удовлетворительно полной регистрации событий). Третья аномалия касается изменения средней глубины слабых землетрясений при подготовке сильного землетрясения. Эта аномалия, в предположительном плане, также наблюдалась ранее рядом авторов [Rogozhin, 2009; Mandal, Rodkin, 2014; и др.]. В ООСЗ, по данным мировых каталогов землетрясений [Rodkin, Tikhonov, 2016; Rodkin, 2020], для событий с глубиной $H < 70$ км аномалия всплывания очагов землетрясений была выявлена вполне отчетливо.

Для всех трех перечисленных аномалий в ООСЗ вполне надежно определяется как начало, так и характер развития аномалии в зависимости от времени до момента обобщенного главного события. При этом характер аномалий может быть параметризован. Все выявленные в ООСЗ аномалии начинаются примерно за 100 дней до обобщенного сильного события (ОСЗ).

Средняя интенсивность потока событий N в обобщенной окрестности сильного землетрясения нарастает по степенному закону с уменьшением времени, остающегося до сильного землетрясения Δt :

$$\lg(N) = a + b \lg(\Delta T). \quad (1)$$

Амплитуды A аномалий величин наклона графика повторяемости (аналогично, среднего значения магнитуд $M > M_c$) и средней глубины землетрясений нарастают по мере приближения момента ОСЗ:

$$A = a + b \lg(\Delta T). \quad (2)$$

В (1) и (2) a, b – коэффициенты, возможно различающиеся для разных видов аномалий и для разных наборов данных.

Подчеркнем, что первые две аномалии – роста числа событий и средней магнитуды землетрясений – характеризуют потерю системой устойчивости, но без указания на конкретный физический механизм землетрясений. На качественном уровне эти аномалии являются почти тавтологией. Действительно, первая из них представляет собой утверждение, что «предвестником высокой сейсмической активности является рост числа землетрясений». Вторая аномалия на качественном уровне формулирует, что «предвестником возникновения сильного землетрясения является рост среднего значения магнитуды землетрясений». Нетривиальный смысл эти аномалии получают после параметризации характера развития аномалий.

Третья аномалия носит более специальный характер и уже отражает физический механизм землетрясений. Согласно работам [Rodkin, 2008, 2012, 2020; Rodkin, Tikhonov, 2016], характер этой аномалии (для событий с $H < 70$ км) также описывается соотношением типа (2). Всплывание очагов землетрясений связывается в этих работах с прорывом вверх, по образуемым зонам трещиноватости, флюида малой плотности.

Заметим, что в тех областях, где флюида мало или он играет второстепенную роль, такая интерпретация не проходит. Эмпирические данные подкрепляют такое различие. На рис. 1, по данным GCMТ каталога [Rodkin, 2022; Rodkin, Liperovskaya, 2023], представлены средние значения разницы глубин землетрясений, они оценены по данным о положении гипоцентра и по решению сейсмического момента (значения определялись

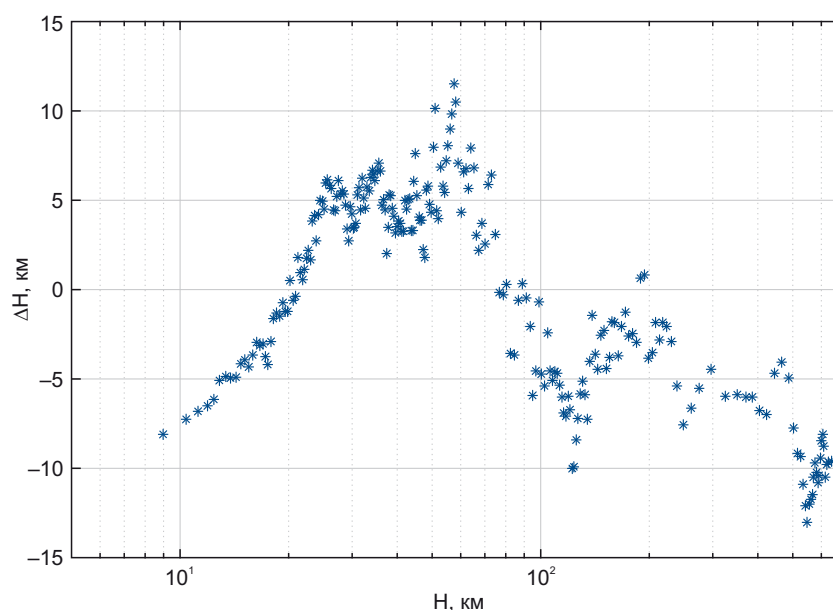


Рис. 1. Средние значения разницы глубин землетрясений по данным о положении гипоцентра и по решению сейсмического момента. Даны средние значения для групп из 120 событий с шагом 60 событий (по [Rodkin, Liperovskaya, 2023]).

Fig. 1. The average values of the difference in earthquake depths from the hypocenter locations and according to the solution of seismic moment. There are given the average values for groups of 120 events in increments of 60 events (after [Rodkin, Liperovskaya, 2023]).

по методу среднее арифметическое). Были взяты средние значения для последовательных по глубине групп из 120 землетрясений с шагом 60 событий (расчет сделан для событий с $M_c = M_w \geq 5.4$).

Видно, что в интервале глубин от ~20 до 90 км гипоцентры расположены систематически глубже значений глубин землетрясений, полученных по решению сейсмического момента. То есть сейсмический процесс развивается преимущественно вверх, что и следует ожидать, если в очаговой зоне существенно присутствие флюида низкой плотности. Для землетрясений глубже 90–100 км и для событий с глубиной менее 20 км преимущественное развитие очага направлено вниз, в направлении роста температур. Можно видеть, что преимущественное развития очагового процесса вверх отвечает интервалу глубин, где развитие сейсмичности в значительной степени связывается с наличием в очаговой области флюидной компоненты.

Различие физики разноглубинных землетрясений подкрепляется статистическим анализом характера ионосферного отклика на сильные землетрясения. Средний характер сейсмоионосферного отклика для коровых, среднеглубинных и для глубоких землетрясений оказывается статистически значимо различным [Rodkin, Liperovskaya, 2023].

Получение совокупности хорошо параметризованных предвестниковых аномалий позволяет поставить вопрос – нельзя ли на их основе построить алгоритм прогноза землетрясений? Преимуществом такого подхода могло бы быть использование сразу нескольких надежно и достаточно точно параметризованных аномалий. Добавим, что при этом представляется принципиально возможным прогнозировать также и глубину сильного землетрясения, что в известных на данное время алгоритмах прогноза не предполагается.

Ниже решается задача уточнения характера средних прогнозных аномалий для региона Камчатка – Северные Курилы.

3. ДАННЫЕ

В работе [Rodkin et al., 2020] обобщенную окрестность для региона Камчатка исследовали по данным каталога курило-камчатских землетрясений с 1737 г. [Andreeva, Kim, 2012], пополненным из бюллетеня ISC [Bulletin..., 2020] по март 2020 г. Сформированный таким образом каталог включал 44153 землетрясения с магнитудой $M \geq 3.0$. В данной работе, как более однородный и более полный, используется каталог КФ ФИЦ ЕГС РАН [Catalog..., 2023] с 1962 по июль 2023 г., включающий 64516 события (с $M \geq 3.5$); каталог для таких событий удовлетворительно полон, дополнительной отбраковки ниже не проводится. Использование более однородного и более полного каталога позволило заметно уточнить полученные в работе [Rodkin et al., 2020] результаты. Заметим, что в последующих работах [Rodkin, 2022; Rodkin, Liperovskaya, 2023] были выявлены также определенные различия характера сейсмического процесса для разноглубинных земле-

трясений; это также потребовало проверки единообразия или различия ООСЗ аномалий для разноглубинных землетрясений.

Разграничение землетрясений по глубине в связи с различиями физики очагового процесса является на настоящий момент не вполне определенным. В данной статье будут использованы два варианта разбиения. В качестве первого используем привычное разделение на коровые землетрясения до 50 км, среднеглубинные – от 50 до 150 км и на глубокие – глубже 150 км. В качестве второго варианта, с учетом результатов рис. 1, будем рассматривать разбиение на наиболее мелкие землетрясения до глубины 20 км, от 20 до 100 км и глубже 100 км. В обоих случаях будем рассматривать подборки, когда и главное событие, и его фор- или афтершоки отвечают данному интервалу глубин.

В качестве главных событий примем землетрясения $M = 6.5+$, таких в используемом каталоге 49. Такого числа, как показывают предыдущие работы по обобщенной окрестности [Rodkin, 2008, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016], недостаточно для точного определения параметров соотношений (1) и (2), однако достаточно для выделения возможных региональных особенностей в характере прогнозных аномалий. Попавшими в обобщенную окрестность полагались события с эпицентрами, отстоявшими от эпицентра соответствующего основного землетрясения не более чем на три размера очага R , где размер оценивался по формуле [Sobolev, 1993]:

$$\lg R(\text{км}) = 10^{0.5M - 1.9}. \quad (3)$$

Ожидаемые аномалии имеют вид (1) и (2). В зависимости от разброса значений исследуемого параметра рассматриваются группы из 50 или 100 землетрясений, сортированных по времени относительно момента ОСЗ с перекрытием по 25 или 50 событий соответственно.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как уже отмечалось выше, аномалии роста числа событий и изменения наклона графика повторяемости отражают развитие в системе неустойчивости безотносительно к конкретному физическому механизму реализации землетрясения (обычное тектоническое событие, инициированное высоким флюидным давлением, фазовыми превращениями или иными механизмами). Сравним сначала характер реализации этих аномалий для разноглубинных землетрясений.

На рис. 2, а, б, приведены фор- и афтершоковые аномалии для средней интенсивности потока сейсмических событий для интервалов глубин 0–20, 20–100 км и более 100 км. Расчет проводился для последовательных групп из 50 землетрясений с перекрытием по 25 событий.

Как видно на рис. 2, режим развития средних фор- и афтершоковых последовательностей разноглубинных землетрясений довольно близок. Видные на рис. 2 в ООСЗ сильные всплески числа фор- и афтершоков

вызваны близкорасположенными другими сильными событиями. Как было уже ранее показано на примере Камчатского региона, имеет место существенная кластеризация независимых сильных событий [Rodkin et al., 2020; Rodkin, Liperovskaya, 2022]. Во всех трех интервалах глубины ООСЗ аномалии начинаются примерно за 100 дней до главного события (для интервала глубин 20–100 км предвестниковая аномалия, возможно, начинается чуть позже). Средняя длительность афтершоковой аномалии больше, до 1–3 лет. Степенные параметры p для разноглубинных землетрясений значимо не различаются; при этом, как уже ранее отмечалось в работе [Rodkin, 2008], значение этого параметра для форшоков меньше; соответственно, число форшоков в среднем нарастает медленнее, чем убывает число афтершоков. При этом максимальная средняя интенсивность потока числа форшоков для всех глубинных интервалов более чем на порядок меньше

интенсивности потока афтершоков. Всплески существенно более выражены на рис. 2, а (для форшоков), так как средний уровень потока форшоков примерно на порядок ниже.

На рис. 3, а, б, аналогично представлены средние аномалии роста средней магнитуды землетрясений. Можно видеть, что тенденции роста и уменьшения аномалии «среднее значение магнитуды» для разноглубинных землетрясений несколько различаются. Мы не беремся пока сказать, является ли такое различие значимым, для ответа на этот вопрос требуется анализ данных по другим регионам и мировым.

Как и следовало ожидать, региональных данных недостаточно для получения четкого количественного образа прогнозных аномалий. Разброс данных на рис. 3 весьма большой, но характер аномалий для разноглубинных землетрясений представляется вполне определенно и в целом единообразно.

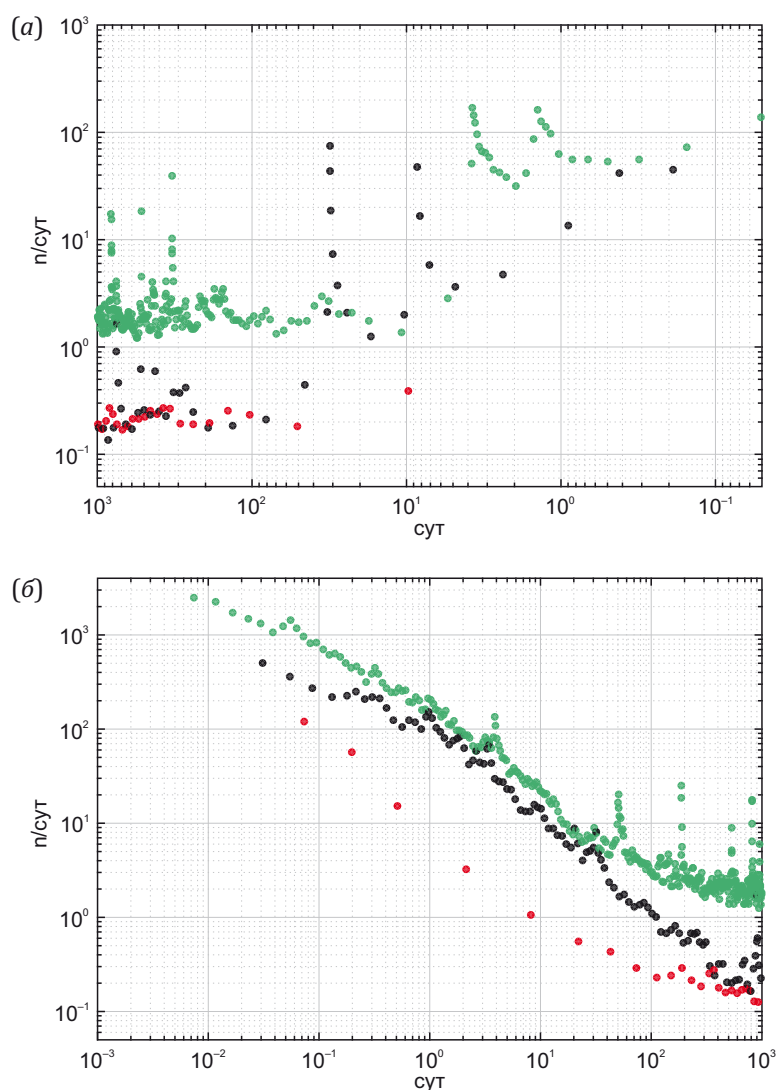


Рис. 2. Режимы активности для землетрясений: (а) – форшоковая; (б) – афтершоковая. Глубина землетрясений: черные точки – до 20 км включительно, зеленые точки – от 20 до 100 км, красные точки – более 100 км.

Fig. 2. Modes of earthquake activity: (а) – foreshock; (б) – aftershock. Earthquake depth: black points – up to 20 km inclusive, green points – 20 to 100 km, red points – more than 100 km.

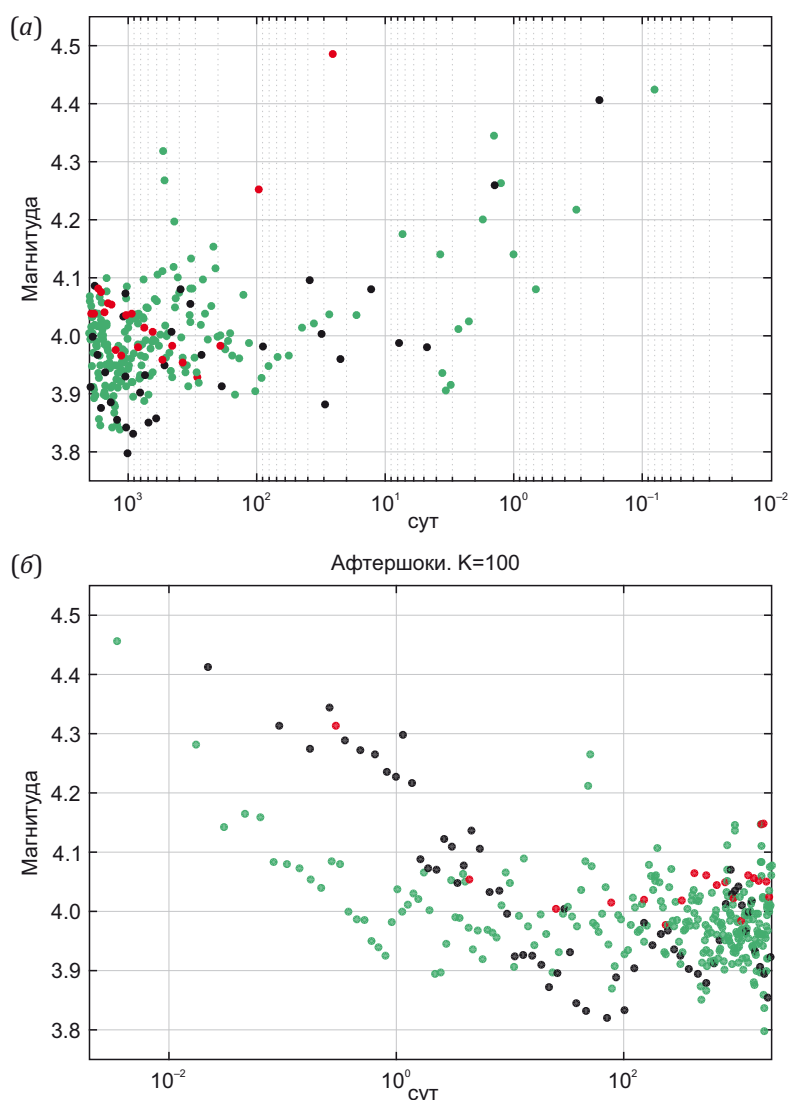


Рис. 3. Изменения среднего значения магнитуды для последовательных групп из 100 событий с перекрытием по 50 событий. Глубина землетрясений: черные точки – до 20 км включительно, зеленые точки – от 20 до 100 км, красные точки – более 100 км.

Fig. 3. Changes in the average magnitude for consecutive groups of 100 events with an overlap of 50 events. Earthquake depth: black points – up to 20 km inclusive, green points – 20 to 100 km, red points – more than 100 km.

Выше отмечалось, что аномалии в потоке событий и в наклоне графика повторяемости не детализируют физический механизм землетрясений, а только указывают на факт развития неустойчивости. В отличие от них, аномалия, связанная с изменением средней глубины землетрясений, носит более специфический характер. На рис. 4, а–в, показаны изменения средней глубины землетрясений для событий с глубиной не более 20 км, от 20 до 100 км и более 100 км. За нулевую точку отсчета выбран день землетрясения. Видно, что для первых двух интервалов имеет место тенденция уменьшения глубины землетрясений, а для событий глубже 100 км – увеличения. Заметим, что по мировым данным (см. рис. 1), скорее можно было ожидать увеличение глубины землетрясений также и для наиболее мелких событий, с $H \leq 20$ км, но по данным для Курило-Камчатского региона такого эффекта не наблюдается.

Далее сравним характер изменения средней глубины землетрясений выше и ниже 150 км. На рис. 5, 6 представлены фор- и афтершоковые аномалии средней глубины событий глубиной 50–150 км и более 150 км.

Как видно на рис. 5 и 6, в ближней окрестности промежуточных землетрясений, с глубиной очага до 150 км, отчетливо видна тенденция всплывания очагов землетрясений. Напротив, в окрестности более глубоких землетрясений, возникновение которых связывается не с наличием высоконапорного флюида, а с фазовыми превращениями в погружающейся плите, наблюдается тенденция заглубления очагов землетрясений. Заметим, что тенденция изменения глубины не однонаправленная: на рис. 6, а, б, сначала наблюдается тенденция уменьшения и только затем – роста глубины событий. Мы затрудняемся интерпретировать эти результаты. Заметим также, что рост в ООСЗ средней

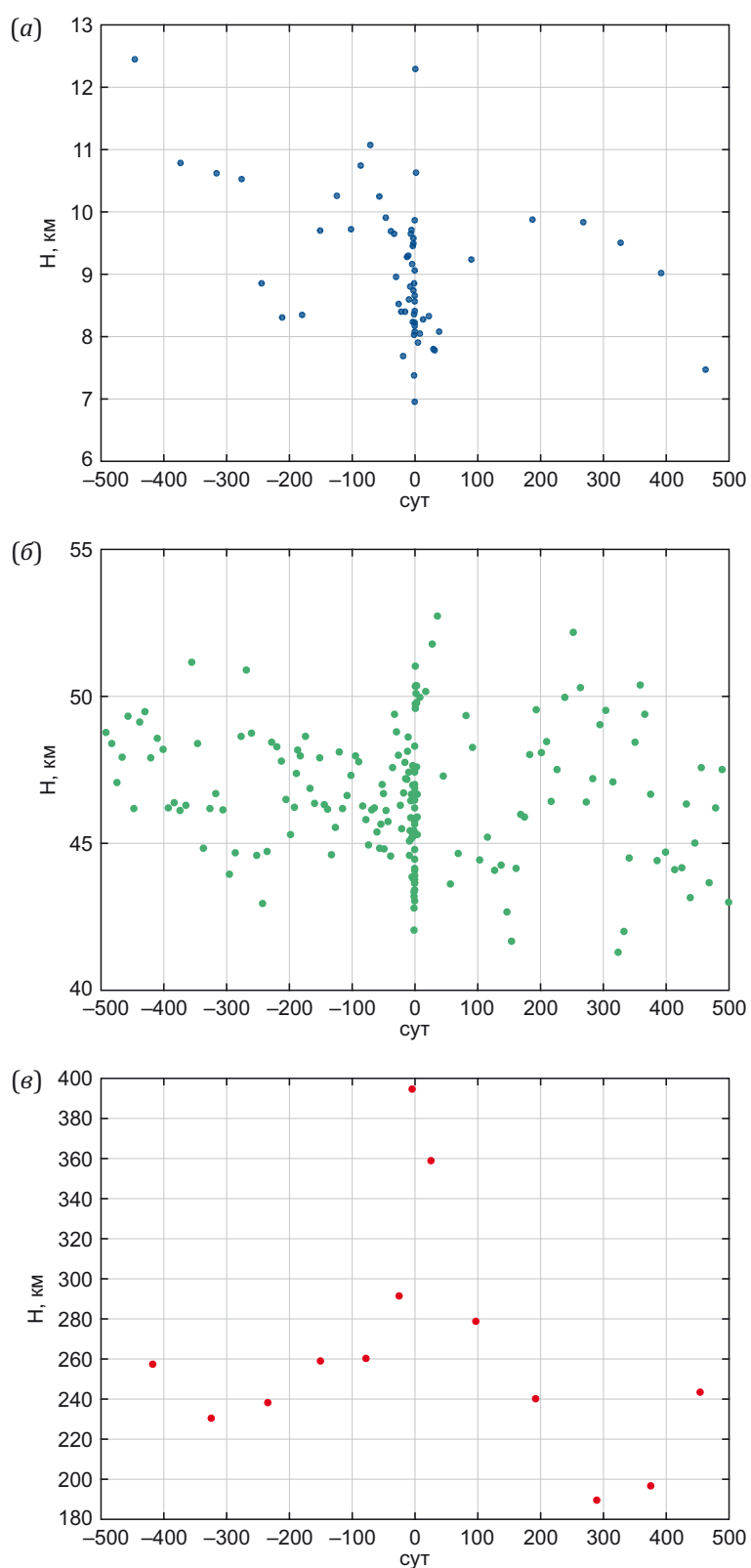


Рис. 4. Различия изменения глубин землетрясений в очаговой зоне для разноглубинных землетрясений: (а) – до 20 км включительно, (б) – от 20 до 100 км, (в) – более 100 км.

Fig. 4. The difference in the change in depths of earthquakes in the focal zone: (a) – up to 20 km inclusive, (б) – 20 to 100 km, (в) – more than 100 km.

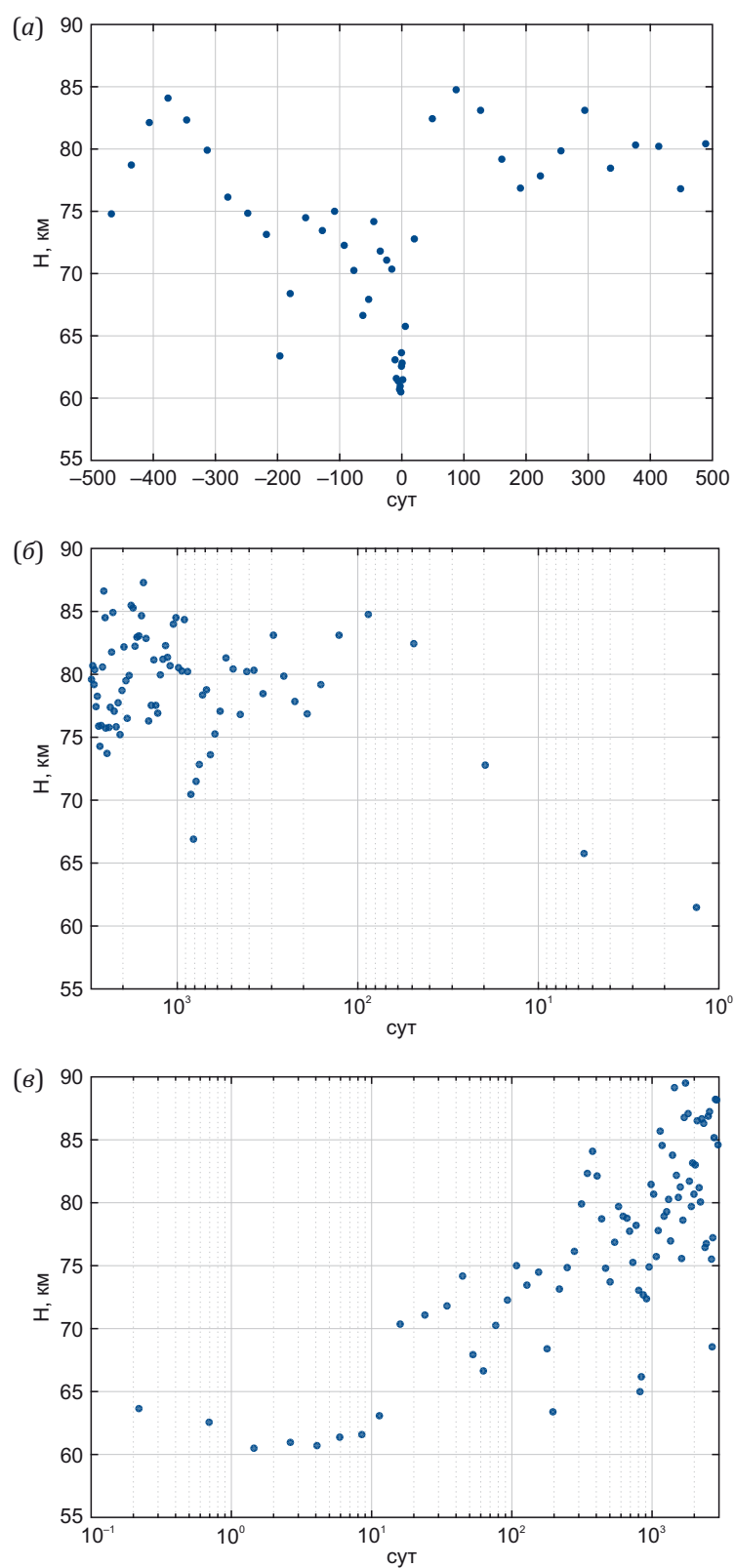


Рис. 5. Изменение средней глубины землетрясений для очаговых зон 50–150 км: (а) – в линейной шкале глубин и полулогарифмической шкале глубин, (б) – форшоков, (в) – афтершоков.

Fig. 5. The change in the average depth of earthquakes for 50 to 150 km deep focal zones: (a) – in a linear depth scale and a semi-logarithmic depth scale, (б) – foreshocks, (в) – aftershocks.

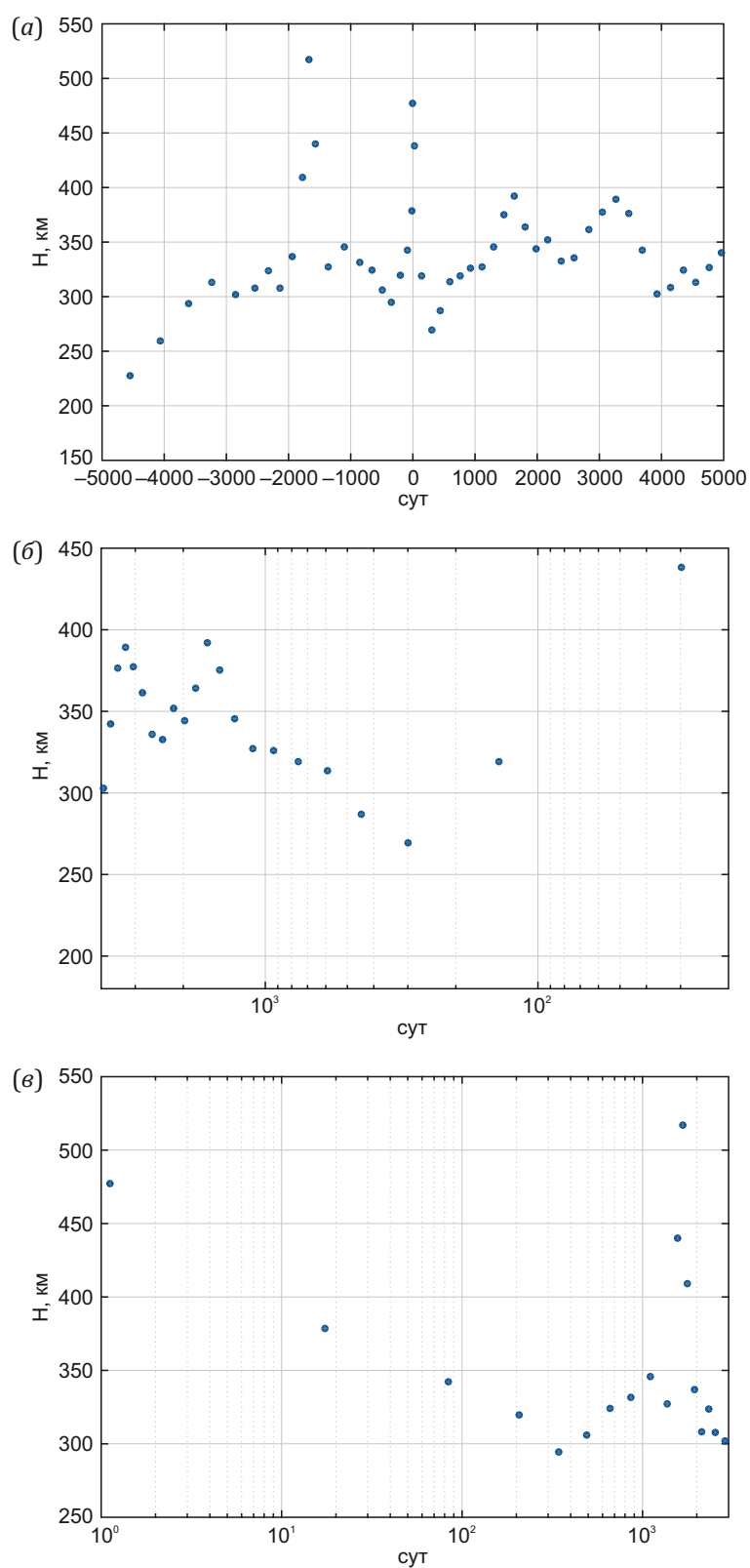


Рис. 6. Изменение средней глубины землетрясений для очаговых зон глубже 150 км: (а) – в линейной шкале глубин и полулогарифмической шкале глубин, (б) – форшоков, (в) – афтершоков.

Fig. 6. The change in the average depth of earthquakes for more than 150 km deep focal zones: (a) – in the linear depth scale and semi-logarithmic depth scale, (б) – foreshocks, (в) – aftershocks.

глубины для событий глубже 100 и 50 км в разы больше, чем уменьшение глубин для менее глубоких землетрясений. Интерпретацию этого наблюдения также оставим на будущее.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено уточнение осредненных, наблюдаемых в ООСЗ, аномалий по данным каталога землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН для Камчатки и севера Курильских островов. По мировым данным ранее были выявлены и параметризованы ООСЗ аномалии для интенсивности потока событий (форшоковый и афтершоковый степенный каскады), для величин наклона графика повторяемости (что эквивалентно изменениям средней магнитуды землетрясений) и для средней глубины более слабых событий в окрестности сильного обобщенного землетрясения. Рассматривался вопрос возможной специфики в характере этих аномалий для разноглубинных землетрясений Курило-Камчатского региона.

Для форшоков и афтершоков событий в диапазоне глубин от 20 до 100 км аномалия роста величины средней магнитуды начинается несколько позже и заканчивается раньше, чем по мировым данным. Также несколько позже среднего начинается и рост числа форшоков (см. рис. 2, а). Устойчива ли такая особенность, и не связана ли она с более высокой ролью флюида в очагах таких землетрясений в Камчатском регионе с высокой скоростью субдукции, не ясно. Развитие эффекта уменьшения глубины в окрестности также и самых мелких землетрясений (если это подтвердится на других массивах данных) может объясняться более интенсивным восходящим флюидным потоком в активных современных зонах субдукции, таких как Камчатка и Курильские острова.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа каталога землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН для Курило-Камчатского региона методом построения обобщенной окрестности сильного землетрясения авторами сделаны следующие выводы.

Подтверждается единообразие аномалий изменения интенсивности потока событий и наклона графика повторяемости (аналогично изменению средней магнитуды землетрясений) для землетрясений разного интервала глубин. Единственным возможным различием является более позднее (позднее среднего значения ~100 дней) начало аномалии для промежуточных землетрясений (с глубиной примерно 20–100 км).

Качественные изменения характера аномалий имеют место для средних величин глубины землетрясений. Для неглубоких и промежуточных землетрясений в целом доминирует тенденция уменьшения глубины землетрясений в очаговой зоне сильных событий. Для глубоких землетрясений доминирует тенденция увеличения глубины слабых землетрясений в окрестности сильных событий.

Выявленные характерные особенности осредненного предвестникового поведения будут использованы

как типовые паттерны предвестникового поведения для разноглубинных землетрясений Курило-Камчатского региона. Преимуществом данного подхода перед другими вариантами алгоритмов прогноза является то, что характер искомых предвестниковых аномалий параметризуется по результатам анализа ООСЗ с существенно большей детальностью и что возможен учет различия механизма сейсмогенеза у разноглубинных землетрясений.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Both authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

Both authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Aki K., 1965. Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log N = a - bM$ and Its Confidence Limits. *Bulletin of Earthquake Research* 43, 237–239.

Andreeva M.Yu., Kim Ch.U., 2012. Earthquakes of the Kurile-Kamchatka Region (1737–2009). IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, 384 p. (in Russian) [Андреева М.Ю., Ким Ч.У. Землетрясения Курило-Камчатского региона (1737–2009 гг.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2012. 384 с.].

Bulletin of the International Seismological Centre, 2020. Available from: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/.html> (Last Accessed March 16, 2020).

Catalog of Earthquakes in Kamchatka and the Commander Islands, 2023. 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., 1997. Earthquakes Cannot Be Predicted. *Science* 275 (5306), 1616. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>.

Jordan T.H., Chen Y.-T., Gasparini P., Madariaga R., Main I., Marzocchi W., Papadopoulos G., Sobolev G., Yamaoka K., Zschau J., 2011. Operational Earthquake Forecasting: State of Knowledge and Guidelines for Utilization. *Annals of Geophysics* 54 (4), 315–391. <https://doi.org/10.4401/ag-5350>.

Kagan Y.Y., Jackson D.D., 2000. Probabilistic Forecasting of Earthquakes. *Geophysical Journal International* 143 (2), 438–453. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2000.01267.x>.

Kossobokov V.G., Shchepalina P.D., 2020. Times of Increased Probabilities for Occurrence of World's Largest Earthquakes: 30 Years Hypothesis Testing in Real Time. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 56, 36–44. <https://doi.org/10.1134/S1069351320010061>.

Kossobokov V.G., Soloviev A.A., 2015. Evaluating the Results of Testing Algorithms for Prediction of Earthquakes. *Doklady Earth Sciences* 460, 192–194. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15020208>.

Mandal P., Rodkin M., 2014. Spatiotemporal Variation of Fractal Properties in the Source Zone of the 2001 Mw 7.7 Bhuj Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 104 (4), 2060–2072. <https://doi.org/10.1785/0120140071>.

Rodkin M.V., 2008. Seismicity in the Generalized Vicinity of Large Earthquakes. *Journal of Volcanology and Seismology* 2, 435–445. <https://doi.org/10.1134/S0742046308060055>.

Rodkin M.V., 2012. Patterns of Seismicity Found in the Generalized Vicinity of a Strong Earthquake: Agreement with Common Scenarios of Instability Development. In: A.S. Sharma, A. Bunde, V.P. Dimri, D.N. Baker (Eds), *Extreme Events and Natural Hazards: The Complexity Perspective*. Vol. 196. American Geophysical Union, p. 27–39. DOI:10.1029/2011GM001060.

Rodkin M.V., 2020. A Typical Foreshock and Aftershock Anomaly: Observations, Interpretation, and Applications. *Journal of Volcanology and Seismology* 14, 58–69. <https://doi.org/10.1134/S0742046320010066>.

Rodkin M.V., 2022. 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 and Applied Geophysics* 179, 4197–4206. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02927-4>.

Rodkin M.V., Andreeva M.Y., Grigorieva O.O., 2020. An Analysis of the Generalized Vicinity of a Large Earthquake Using Regional Data: The Kuril-Kamchatka Region. *Journal of Volcanology and Seismology* 14, 410–419. <https://doi.org/10.1134/S074204632006007X>.

Rodkin M.V., Liperovskaya E.V., 2022. Irregularities in the Intensity of the Flow of Main Events: An Example of the Shallow Seismicity in the Kamchatka Region. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 58, 520–533. <https://doi.org/10.1134/s1069351322040073>.

Rodkin M.V., Liperovskaya E.V., 2023. On the Difference in Physical Mechanisms of Different Depth Earthquakes and Their Ionospheric Response Patterns. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 59, 377–390. <https://doi.org/10.1134/S1069351323030114>.

Rodkin M.V., Tikhonov I.N., 2016. The Typical Seismic Behavior in the Vicinity of a Large Earthquake. *Physics and Chemistry of the Earth* 95, 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.001>.

Rogozhin E.A., 2009. Seismotectonics of the Central Greater Caucasus as a Base for Seismic Monitoring and Seismic Hazard Assessment. *Vestnik of the Vladikavkaz Scientific Center* 9 (4), 16–22 (in Russian) [Рогожин Е.А. Сейсмоструктура центрального сектора Большого Кавказа как основа для сейсмического мониторинга и оценки опасности // Вестник Владикавказского научного центра. 2009. Т. 9. № 4. С. 16–22].

Sobolev G.A., 1993. *Fundamentals of Earthquake Forecasting*. Nauka, Moscow, 314 p. (in Russian) [Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.].

Sobolev G.A., Ponomarev A.V., 2003. *Physics of Earthquakes and Precursors*. Nauka, Moscow, 270 p. (in Russian) [Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.].

Zavyalov A.D., 2006. *Medium-Term Earthquake Forecast: Basics, Methodology, Implementation*. Nauka, Moscow, 242 p. (in Russian) [Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 242 с.].