

Долгосрочный сейсмический прогноз на II 2023–I 2027 гг. Концепция методики мониторинга геофлюидодинамических процессов региона на основе плоскоориентированных кластеров

Соломатин А.В., Солдатова П.Д.

Long-term seismic forecast for II 2023–I 2027. Concept of methodology for monitoring of geofluidodynamic processes in the region based on plane-oriented clusters

Solomatina A.V., Soldatova P.D.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: alf55@mail.ru

Представлены актуальные данные долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) по методу С.А. Федотова для Курильских островов и Камчатки. В качестве развития метода ДССП предложена концепция мониторинга состояния сейсмоактивной среды с использованием представлений о флюидодинамической природе плоскоориентированных кластеров сейсмических событий.

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на I 2023–XII 2027 гг.

На основе базового метода ДССП [4] представлен прогноз сильнейших землетрясений для Курило-Камчатского региона на период I 2023–XII 2027 гг. Основные результаты прогноза заключаются в следующем.

Сохраняется очень высокая сейсмическая опасность в районе г. Петропавловск-Камчатский (прогнозные участки 11, 12 и, отчасти – 13, рисунок), где пятилетняя вероятность возникновения землетрясения с магнитудой $M \geq 7.7$ $P(M \geq 7.7)$ и силой 7-9 баллов в районе г. Петропавловск-Камчатский достигает величины 46.1 %. Пятилетняя вероятность того, что такое землетрясение будет иметь силу 9 баллов и катастрофические последствия в г. Петропавловск-Камчатский, превышает 12.6 %, что в 3-4 раза выше средней такой опасности по исследуемому, наиболее сейсмичному в РФ, региону.

На Курильских островах опасность сильнейшего землетрясения существенно ниже, при этом она максимальна в районе Средних Курильских о-вов (участки 6, 8 и 9, рисунок) – вблизи концов главного разрыва Симуширского землетрясения 15.IX 2006 г., $M=8.2$. Вероятности $P(M \geq 7.7)$ в этих участках оцениваются величинами 6.9 %, 9.8 % и 9.1 %, соответственно.

Участок 10 в районе Северных Курильских островов, расположенный между двумя указанными выше протяженными сейсмическими брешами, также характеризуется высокой сейсмической активностью, что указывает на существенную вероятность его охвата областью очага следующего сильнейшего землетрясения.

Для лучшего понимания текущего уровня сейсмической опасности в регионе необходимо продолжать и развивать всеми имеющимися методами непрерывные наблюдения за сеймотектоническими процессами, особенно в Авачинском заливе.

Повышенную опасность представляют также сейсмические бреши в районе Камчатского залива (участок 15), где до настоящего времени проявляются тектонические последствия Ближне-Алеутского землетрясения 2017 г., и в участке 1 (м. Сириха – п-ов Немуро), рисунок.

В целом, приведенный долгосрочный сейсмический прогноз землетрясений с $M \geq 7.7$ для Курило-Камчатской дуги следует использовать, как это делалось с предыдущими такими прогнозами [3], для обоснования и принятия необходимых государственных мер по предотвращению катастрофических потерь и ущерба в Камчатском крае, неизбежных без таких мер. Для этого в угрожаемых районах и, прежде всего, в г. Петропавловск-Камчатский ежегодно должно существенно возрастать количество граждан, живущих в сейсмоустойчивых домах.

Приведенный сейсмический прогноз является одновременно прогнозом больших цунами как последствий сильнейших землетрясений на Курильских о-вах и Камчатке.

Концепция P -нормировки

Изучение достаточно сложных процессов, к которым, несомненно, относятся флюидогеодинамические, не всегда оптимально на основе физически наблюдаемых параметров. Примером практического использования такого представления может служить успех в различных областях научных исследований информационно-энтропийного подхода, когда наблюдаемые значения параметров изучаемого процесса заменяются вероятностями, соответствующими этим значениям. В наиболее общем виде при этом можно говорить о применяемой для стандартизации данных нормировке.

Отмечая теоретическую и практическую важность подобного подхода, все же необходимо отметить ряд существенных ограничений, накладываемых при его использовании.

Так, при построении информационной энтропии необходимы достаточно полные сведения о системе. Такое требование к иерархичной геосреде, характеризующейся к тому же многочисленными сложными и малоизученными процессами самой различной природы, представляется далеко не всегда выполнимым. Также не всегда оправдана при этом сильно опосредованная связь между величинами используемых параметров и их вероятностным представлением.

Построение оценок параметров геосреды, сочетающих достоинства информационно-энтропийного подхода с исключением отмеченных недостатков последнего, возможно на основе представления дивергенции Кúльбака-Лéйблера. При этом в итоге используется не полная энтропия изучаемой системы, а кумулятивный временной ряд ее поточечных вариаций. Предварительно для изучаемого параметра предлагается использование монотонного преобразования, отображающего исходные-наблюдаемые величины, в параметр P -типа, характеризующийся равномерным распределением на ограниченном в пределах от 0 до 1 интервале.

Так как параметры P -типа по своей сути могут быть представлены в виде вероятностей достижения (недостижения) исходными параметрами некоторого заданного уровня, физические законы, представляющие их соотношения (часто неизвестные), после P -отображения могут быть заменены гораздо более простыми законами теории вероятностей.

Использованные в работе материалы

В работе использовался региональный каталог землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН (<https://sdis.emsd.ru/>) за период I.1 1966–31.XII 2022 гг. Построения проводились для землетрясений энергетического класса $K=9.7$ и выше. Эти параметры были выбраны с учетом максимальной представительности данных и длины исследуемого временного интервала, а также с учетом возможностей программы определения плоскоориентированных кластеров Frac-Digger [2, 5] – около 60 000 исходных событий.

Методика работы, ее основные результаты и выводы

Теоретической основой работы являются представления о флюидном механизме разрывообразования в геосреде [2, 5]. В качестве методологической основы использовались оценки на основе P -преобразования углов вертикальной и горизонтальной ориентации плоскости падения.

Для построения параметра P -типа – p использовалось приближение указанных углов на уровне ранговых соотношений, что в случае циклических по своей сути переменных достаточно условно. Тем не менее, применение кумулятивных временных рядов, построенных на основе дивергенции Кúльбака-Лéйблера, но симметричных относительно среднего значения $p = 0.5$ в виде:

$$S(t) = -\Sigma(\ln(p(t)) - \ln(1 - p(t)))/2 - 1 \quad (1)$$

позволило получить достаточно четкие вариации, которые оказались в высокой степени синхронизированными как между собой, так и с синусоидальной кривой,

аппроксимирующей 55.8-летнюю (лунную) периодичность сильных землетрясений Камчатки [1].

Дополнительно, учитывая, что в случае использования углов в качестве исходных параметров рационально использовать и геометрически естественное $\text{Cos}()$ -преобразование, изучался также временной ряд вида:

$$S(t) = -\Sigma \text{Cos}(\alpha(t) - \alpha_0), \quad (2)$$

где α – представление каждого из углов ориентации плоскоориентированных кластеров, а α_0 – некоторое базовое для каждого из этих углов значение.

Важно, что итоговый результат, полученный на основе $\text{Cos}()$ -преобразования углов ориентации плоскоориентированных кластеров (2), практически совпал с аналогичным результатом на основе информационных представлений величин этих углов (1). Такое совпадение служит подтверждением устойчивости полученных обоими (условно: информационно-энтропийным и геометрическим) способами результатов.

В качестве итога работы представляется очевидным следующее:

1) Периодичность вариаций свойств выделенных на основе программы Frac-Digger плоскоориентированных кластеров Камчатской сейсмогенной зоны, являясь индикатором региональных сеймотектонических процессов, может быть использована для прогноза наиболее сильных землетрясений региона. Этот прогноз достоверен на том же уровне, что и на уровне лунных 55.8-летних периодичностей [1]. При этом, в дальнейшем не исключена дополнительная детализация такого прогноза.

2) Выявленная связь вариаций ориентации плоскоориентированных кластеров с изменениями сеймотектонических условий наиболее очевидна при симметричном учете отклонений определяющих ее углов от соответствующих базовых значений. В то же время, исследования отмеченных выше рядов в их несимметричном виде: $-\text{Ln}(p)$, $-\text{Ln}(1-p)$, или $\text{Sin}(\alpha(t) - \alpha_0)$, могут раскрыть дополнительные возможности.

3) Поскольку, по всей видимости, выявленные закономерности связаны с хорошо известным приливным воздействием, результаты настоящей работы потенциально могут быть использованы для уточнения применяемых количественных параметров условий разрывообразования в сейсмогенной среде.

Имея несомненное самостоятельное теоретическое и практическое значение, а также существенные перспективы в плане определения параметров региональной флюидогеодинамики, полученные в работе результаты могут быть полезны также для расширения представлений метода ДССП и развития методик мониторинга состояния сейсмоактивной геосреды на его основе, в том числе и на основе P -параметров.

Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ и JSPS в соответствии с исследовательским проектом № 21-55-50003.

Список литературы

1. 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.
2. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008-2012 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 3-20.
3. Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на X 2019–IX 2024 гг.; развитие методики мониторинга сейсмического процесса на основе энтропийных оценок // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. 2020. С. 128-131.
4. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
5. Kiryukhin A., Lavrushin V., Kiryukhin P., Voronin P. Geofluid systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia) // Geofluids. 2017. V. 2017. Art. 4279652. <https://doi.org/10.1155/2017/4279652>