

УДК: 550.348.436

DOI: 10.46698/VNC.2026.15.57.001

Оригинальная статья

Геодинамические ограничения сейсмической опасности Крыма по данным космической геодезии (РСДБ, ЛЛС, ГНСС)

А.Е. Вольвач[✉], А.И. Дмитроца[✉], Д.И. Неяченко[✉]

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Россия, 298688, г. Ялта,
e-mail: volvach@bk.ru

Статья поступила: 10.02.2026, доработана: 05.06.2026, принята к публикации: 10.06.2026

Резюме: Актуальность работы. Оценка сейсмической опасности Южного берега Крыма требует учёта современных геодинамических данных, поскольку модели PSHA, основанные преимущественно на сейсмологических каталогах, сопровождаются значительной неопределённостью параметров повторяемости землетрясений и максимальной возможной магнитуды. Независимые кинематические ограничения позволяют уточнить уровень современной деформационной активности региона и повысить надёжность интерпретации сейсмического режима. **Цель исследования** – определить современные кинематические характеристики Крымского полуострова по данным космической геодезии и оценить их значение для интерпретации параметров сейсмической опасности, включая повторяемость землетрясений и возможные значения $M_{\max}$. **Методы исследования.** Использованы данные радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), спутниковых ГНСС-измерений и лазерной дальнометрии (ЛЛС), обработанные в системе отсчёта ITRF2020. Сейсмический анализ выполнен на основе сводного каталога землетрясений (1919–2026 гг.) с оценкой параметров закона Гутенберга–Рихтера для различных периодов полноты каталога. **Результаты.** Установлено, что абсолютная горизонтальная скорость движения Крыма составляет 34.2 мм/год, а относительная скорость в системе стабильной Евразии не превышает 3.5 мм/год, что указывает на внутриплитный характер современных деформаций. Вертикальные движения характеризуются устойчивым опусканием поверхности со скоростью 3–4 мм/год. Показано, что учёт геодезических ограничений согласуется с низким уровнем накопления тектонических напряжений и позволяет уточнить параметры повторяемости землетрясений и оценку сейсмического потенциала региона.

Ключевые слова: Крым, сейсмическая опасность, PSHA, GNSS, VLBI, деформация земной коры, закон Гутенберга–Рихтера, PGA.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН «КРАО РАН».

Для цитирования: Вольвач А.Е., Дмитроца А.И., Неяченко Д.И. Геодинамические ограничения сейсмической опасности Крыма по данным космической геодезии (РСДБ, ЛЛС, ГНСС). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(2): 20–31. DOI: 10.46698/VNC.2026.15.57.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.15.57.001

Original paper

Geodynamic constraints on seismic hazard in Crimea based on space geodetic data (VLBI, SLR, GNSS)

A.E. Volvach^{ORCID}, A.I. Dmitrotsa^{ORCID}, D.I. Neyachenko^{ORCID}Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences,
Yalta 298688, Russian Federation, e-mail: volvach@bk.ru

Received: 10.02.2026, revised: 05.06.2026, accepted: 10.06.2026

Abstract: Relevance. Seismic hazard assessment of the Southern Coast of Crimea requires the integration of modern geodynamic data. This is because traditional PSHA models rely primarily on seismological catalogs. As a result, these models introduce significant uncertainty when estimating earthquake recurrence rates and the maximum possible magnitude. Independent kinematic constraints help refine the level of present-day deformation and improve the reliability of seismic hazard interpretation. **Aim** of the study is to determine the present-day kinematic characteristics of the Crimean Peninsula using space geodetic data and to evaluate their significance for interpreting regional seismic hazard, including earthquake recurrence and possible values of $M_{\max}$. **Methods.** The study employs Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Global Navigation Satellite System (GNSS) measurements, and Satellite Laser Ranging (SLR) data processed in the ITRF2020 reference frame. Seismological analysis is based on a unified earthquake catalog (1919–2026), with Gutenberg–Richter parameters estimated separately for periods of different catalog completeness. **Results.** The absolute horizontal velocity of Crimea is 34.2 mm/yr, while the relative velocity in the stable Eurasia frame does not exceed 3.5 mm/yr, indicating an intraplate deformation regime. Vertical motions show persistent subsidence at a rate of 3–4 mm/yr. Incorporating geodetic constraints is consistent with low present-day strain accumulation and allows refinement of earthquake recurrence parameters and seismic potential of the region.

Keywords: Crimea, seismic hazard, PSHA, GNSS, VLBI, crustal deformation, Gutenberg–Richter law, PGA.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment CrAO RAS.

For citation: Volvach A.E., Dmitrotsa A.I., Neyachenko D.I. Geodynamic constraints on seismic hazard in Crimea based on space geodetic data (VLBI, SLR, GNSS). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(2): 20–31. DOI: 10.46698/VNC.2026.15.57.001

Введение

Разломная структура Крымского полуострова представлена системой крупных линейментов субширотного и северо-восточного простирания, подтверждённых геологическими и геофизическими данными. К числу наиболее значимых относятся Каркинитско–Сивашский, Донузлавский, Евпаторийско–Нижнегорский и Луккульско–Каменский разломы (рис. 1а), формирующие блоковое строение региона и контролирующее распределение современной сейсмичности [Сим и др., 2025].

Южный берег Крыма относится к наиболее сейсмоактивным районам Причерноморья. Сейсмичность региона определяется его положением на южной периферии Евразийской литосферной плиты и сложным строением Крымско–Черноморской области, где взаимодействуют Скифская платформа, Крымский ороген и Черноморская впадина [Пустовитенко и др., 1989; Sosson et al., 2017; Свалова, 2019]. Исторические и инструментальные данные свидетельствуют о возможности возникновения сильных землетрясений, включая события 1927 г. с магнитудами 6.7–6.8 [Kondorskaya, Shebalin, 1982]. С учётом высокой плотности населения и развитой инфраструктуры уточнение параметров сейсмической опасности региона имеет важное практическое значение.

Современные оценки сейсмической опасности основаны на вероятностном подходе PSHA, включающем анализ сейсмических каталогов, параметров повторяемости землетрясений, максимальной магнитуды и закономерностей затухания сейсмических воздействий [Cornell, 1968; McGuire, 2004]. Для расчёта пиковых ускорений грунта (PGA) применяются современные зависимости ground motion prediction equations (GMPE) [Akkar, Bommer, 2010; Campbell, Bozorgnia, 2014].

Значительный прогресс в изучении современных геодинамических процессов связан с развитием высокоточных космических геодезических методов – ГНСС, СЛД и РСДБ, обеспечивающих миллиметровую точность определения координат и позволяющих оценивать современные движения и деформации земной коры [Altamimi et al., 2023]. Геодезические данные могут использоваться как независимые ограничения при анализе скорости накопления деформаций и современной сейсмотектонической активности [Kreemer et al., 2014].

Настоящая работа посвящена анализу геодинамических ограничений параметров сейсмической опасности Южного берега Крыма на основе комплексного рассмотрения сейсмологических и геодезических данных. Используются региональный каталог землетрясений, результаты наблюдений на станции «Симеиз» (ГНСС, СЛД и РСДБ) [Petrov et al., 2001], а также сценарные оценки PGA, полученные с применением современных GMPE. Работа не ставит целью построение самостоятельной схемы PSHA/ОСР, а рассматривает возможности использования современных геодезических данных как независимых кинематических ограничений при интерпретации параметров региональной сейсмической опасности.

Методы исследования

Геодинамический полигон «Симеиз–Кацивели», созданный на базе 22-метрового радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории, представляет собой комплекс высокоточных наземных и космических средств наблюдений для мониторинга современных геодинамических процессов в Крыму, прежде всего на Южном берегу (рис. 1б). Радиотелескоп расположен в районе пос. Симеиз, примерно в 20 км к западу от Ялты.

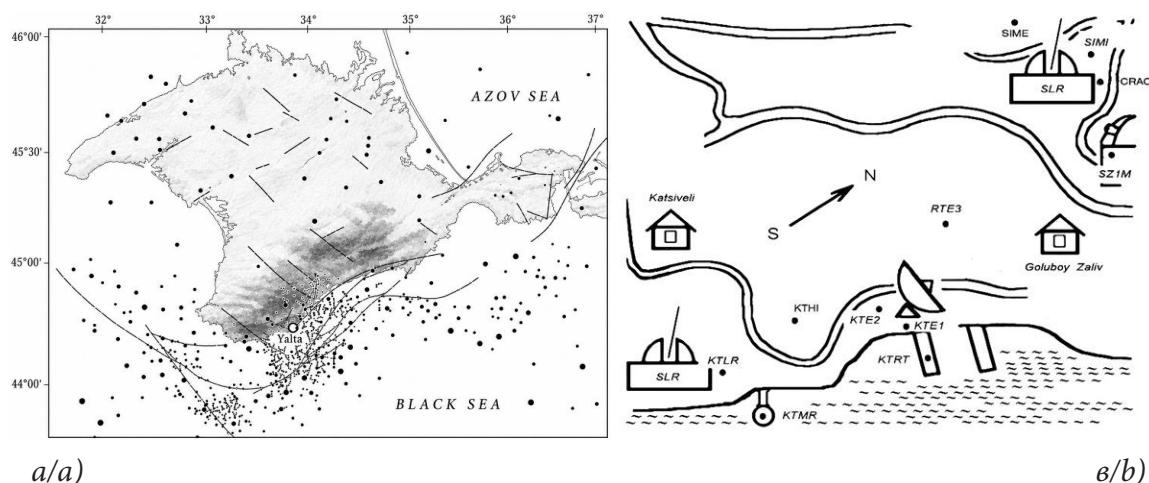


Рис. 1. а) Геолого-географическая схема Крымского региона с эпицентрами землетрясений (1927–2026 гг.) и основными активными разломами, отражающая пространственно-временное распределение сейсмичности и её связь с тектонической структурой. б) Геодинамический полигон «Симеиз–Кацивели» с расположением основных измерительных станций /

Fig. 1. a) Geological and geographic map of the Crimean region with earthquake epicenters (1927–2026) and major active faults, reflecting the spatial and temporal distribution of seismicity and its relationship to the tectonic structure. b) The Simeiz-Katsiveli geodynamic test site with the locations of the main measuring stations

Основу исследований составляют методы космической геодезии: радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ), глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) и лазерная локация спутников (ЛЛС). Дополнительно использовались данные магнитовариационных и наклономерных станций. Комплексное применение этих методов обеспечивает миллиметровую точность определения координат и позволяет оценивать современные горизонтальные и вертикальные движения земной коры в международной системе отсчёта ITRF.

На полигоне выполняются многолетние регулярные наблюдения в кооперации с международными службами РСДБ, ЛЛС и ГНСС, включая радиоинтерферометрические сеансы с участием станции РТ-22, непрерывные решения для ГНСС-станций “CRAO” и “Katsively”, а также лазерные наблюдения на станциях “Simeiz-1873” и “Katsively-1893” [Volvach et al., 2026].

Для анализа временной структуры деформационных сигналов использовались методы спектрального и вейвлет-анализа, позволяющие исследовать эволюцию частотно-временных характеристик многолетних рядов наблюдений.

В работе использован сводный каталог землетрясений Крымского региона по данным USGS и ISC-GEM за период 1919 – февраль 2026 гг. Магнитуды приведены к шкале моментной магнитуды M_w . В анализ включены события с $M \geq 2.5$. Для различных временных интервалов отдельно оценивалась магнитуда полноты каталога M_C .

Методическая основа исследования включает анализ повторяемости землетрясений по закону Гутенберга–Рихтера, оценку параметра b методом максимального правдоподобия, применение пуассоновской модели для оценки долгосрочной вероятности возникновения событий, а также расчёт параметров сильных движений грунта с использованием современных GMPE для мелкофокусных коровых землетрясений.

Пуассоновская модель использовалась как инженерное приближение и не учитывает возможную временную кластеризацию сейсмичности (например, афтершоковые последовательности или активные периоды типа событий 1927 г.). Основные ограничения исследования связаны с неполнотой раннего каталога, ограниченностью данных о локальной разломной структуре и использованием упрощённой модели распределения событий во времени.

Комплексное использование сейсмологических и геодезических данных позволило сопоставить параметры современной деформации земной коры с характеристиками сейсмического режима и получить дополнительные ограничения на уровень накопления тектонических напряжений в регионе. Геодезические данные рассматриваются как независимые кинематические ограничения и не используются для строгого количественного strain-based PSHA-моделирования.

Результаты

Результаты обработки геодезических измерений

На основе комплексного анализа данных геодинамического полигона «Симеиз–Кацивели» получены оценки абсолютных и относительных скоростей движения Крымского полуострова, а также проанализированы временные изменения северной, восточной и вертикальной компонент координат станций космической геодезии. Для определения долговременных кинематических характеристик использованы РСДБ-наблюдения 1979–2024 гг., включающие около 6 млн измерений групповых задержек [Petrov et al., 2001]. Обработка данных выполнялась в программном комплексе CALC/SOLVE методом наименьших квадратов с использованием данных более 100 станций глобальной РСДБ-сети и нескольких сотен внегалактических радиоисточников. Дополнительно анализировались многолетние ряды ЛЛС- и ГНСС-наблюдений, что позволило получить согласованные оценки современных скоростей движения пунктов полигона. В системе отсчёта ITRF2020 средняя

абсолютная горизонтальная скорость движения станций составляет 34.2 ± 0.6 мм/год, что соответствует кинематике Евразийской литосферной плиты. В системе отсчёта, связанной со стабильной частью Евразии, остаточная скорость движения Крымского полуострова не превышает 3.5 ± 0.5 мм/год (рис. 2).

Полученные значения указывают на преимущественно внутриплитный характер современных деформаций и отсутствие значительных относительных смещений, характерных для активных межплитных границ. Горизонтальное перемещение имеет преимущественно северо-восточную направленность.

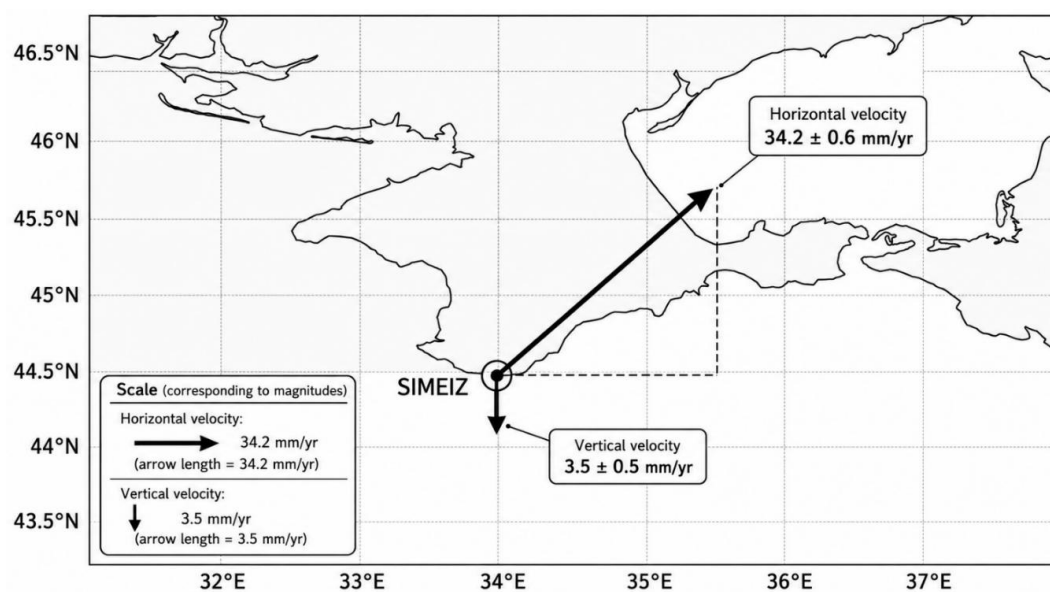


Рис. 2. Современные горизонтальные скорости и вертикальная компонента движения станции «Симеиз» в системе отсчёта ITRF2020 по данным РСДБ, ЛЛС и ГНСС /

Fig. 2. Modern horizontal velocities and vertical component of motion of the Simeiz station in the ITRF2020 reference system based on VLBI, LLS and GNSS data

Вертикальная компонента характеризуется устойчивой тенденцией к опусканию поверхности со скоростью порядка 3–4 мм/год, что, вероятно, связано с совокупным влиянием региональных тектонических и локальных геодинамических процессов.

В целом результаты геодезических наблюдений свидетельствуют о низких скоростях современных деформаций и ограниченных темпах накопления тектонических напряжений в пределах Крымского региона, что может учитываться при оценке его сейсмического потенциала.

Анализ повторяемости землетрясений и параметра b

Повторяемость землетрясений анализировалась на основе закона Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944]: $\log_{10} N(M) = a - b \cdot M$, где $N(M)$ – кумулятивное число землетрясений с магнитудой $\geq M$, параметр (a) характеризует общий уровень сейсмической активности, а параметр (b) отражает относительное соотношение слабых и сильных событий. Оценка параметра (b) выполнялась методом максимального правдоподобия [Aki, 1965]: $b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - (M_c - \frac{\Delta M}{2})}$, где $\bar{M}$ – средняя магнитуда выборки, M_c – магнитуда полноты каталога, ΔM – шаг дискретизации.

В связи с неоднородностью полноты каталога анализ выполнен отдельно для двух временных интервалов. Граница 1957 г. связана с переходом к устойчивому инструментальному мониторингу и снижением магнитуды полноты каталога с $M_c \approx 4.8$ до $M_c \approx 3.0$.

Для периода 1919–1957 гг. получено значение ($b = 0.63 \pm 0.05$) при ($M_c = 4.8$), что отражает повышенную долю землетрясений средней и высокой магнитуды, связанную с серией событий 1927 г. Для периода 1957–2026 гг. при ($M_c = 3.0$) получено ($b = 1.02 \pm 0.04$), характерное для умеренной внутриплитной сейсмичности без выраженного преобладания сильных событий. Полученные параметры закона Гутенберга–Рихтера приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Параметры закона Гутенберга–Рихтера для двух временных интервалов каталога землетрясений Крымского региона / Gutenberg–Richter parameters for two time intervals of the Crimean earthquake catalog

Период / Period	M_c	a	b	N	Интерпретация / Interpretation
1919–1957	4.8	3.7–3.8	0.63 ± 0.05	15	Повышенная доля землетрясений средней и сильной магнитуды, обусловленная серией событий 1927 г. / Increased proportion of moderate-to-strong earthquakes associated with the 1927 sequence
1957–2026	3.0	4.5–4.6	1.02 ± 0.04	40	Умеренная внутриплитная сейсмичность, преобладание слабых и умеренных событий / Moderate intraplate seismicity dominated by low-to-moderate-magnitude events

Примечание: Приведены значения магнитуды полноты каталога M_c , параметров повторяемости a и b, а также число событий N, использованных при оценке. Разделение каталога на периоды 1919–1957 и 1957–2026 гг. связано с изменением полноты и качества инструментальных наблюдений / Note: The table presents the catalog completeness magnitude M_c , recurrence parameters a and b, and the number of events N used in the estimation. The division into the 1919–1957 and 1957–2026 intervals reflects changes in catalog completeness and instrumental data quality.

Здесь N – число событий с магнитудами $M \geq M_c$, использованных при оценке параметров. Несмотря на относительно небольшую статистику, особенно для раннего периода, различия между двумя интервалами отражают переход от режима повышенной концентрации сильных событий к современной умеренной внутриплитной сейсмичности, что согласуется с результатами геодезических наблюдений.

Геодинамические условия и их связь с сейсмической опасностью

Период 1919–1927 гг. характеризуется максимальной сейсмической активностью за весь инструментально-исторический этап наблюдений в Крымском регионе. В этот интервал произошла серия сильных землетрясений с моментными магнитудами до $M_w \approx 6.9$, известная как Крымская сейсмическая серия 1927 года.

Наиболее сильное событие произошло 11 сентября 1927 г. ($M_w \approx 6.9$) в акватории Чёрного моря к югу от Южного берега Крыма. В сентябре 1927 г. зарегистрировано более десяти событий с $M_w > 5.0$, что указывает на активизацию протяжённой разломной зоны. Значимые события также произошли 26 июня 1927 г. ($M_w \approx 6.0$), а также 12 и 14 сентября ($M_w = 5.2–6.1$). Эпицентры локализованы преимущественно вдоль Южнобережной зоны субширотного простирания, соответствующей активным разломам переходной области «континент – Черноморская впадина». Более ранним проявлением активизации региональной сейсмичности может рассматриваться землетрясение 25 декабря 1919 г. ($M_w \approx 5.8$), локализованное в акватории Чёрного моря.

Пространственно-временное распределение событий 1919–1927 гг. демонстрирует выраженную кластеризацию сейсмичности, проявляющуюся во временной сгруппированности сильных землетрясений в пределах ограниченного сегмента Южного

берега Крыма и повышенной плотности эпицентров в зоне активизации единой разломной структуры.

Полученные результаты согласуются с данными геодезических наблюдений полигона «Симеиз–Кацивели», показывающими низкие относительные скорости движения Крыма относительно стабильной части Евразии ($\approx 3\text{--}4$ мм/год) при абсолютной скорости порядка 34 мм/год в глобальной системе отсчёта. Это соответствует преимущественно внутриплитному характеру современной тектонической активности региона, при котором сильные землетрясения происходят сравнительно редко, но могут представлять существенную сейсмическую опасность.

Максимально возможная магнитуда

Оценка предельных магнитудных характеристик региона выполнена на основе комплекса геодинамических, геометрических и сейсмологических ограничений. Геодезические данные рассматриваются как независимые кинематические ограничения, позволяющие оценить реалистичность диапазонов $M_{\max}$ и параметров повторяемости сильных событий.

Согласно результатам РСДБ-наблюдений станции «Симеиз» в составе глобальной сети, обработка около 6 млн измерений за 1994–2024 гг. с использованием комплекса CALC/SOLVE позволила получить устойчивые оценки современных движений станции в системе ITRF2020 [Petrov et al., 2001]. Основная компонента движения соответствует кинематике Евразийской литосферной плиты, тогда как внутриплитные деформации Южного берега Крыма характеризуются существенно меньшими величинами и соответствуют режиму слабой распределённой деформации. Дополнительные ограничения следуют из анализа вертикальных движений, показывающих преобладание отрицательных скоростей порядка нескольких миллиметров в год.

Крымский полуостров расположен на южной окраине Евразийской плиты в зоне влияния напряжений, связанных со взаимодействием Евразийской, Африканской и Аравийской плит, а также западным движением Анатолийского блока. В пределах региона эти процессы проявляются в виде слабых распределённых внутриплитных деформаций без формирования устойчивых зон концентрации скоростей.

Максимальное историческое событие региона связано с Крымской сейсмической серией 1927 г. с магнитудами до $M_w \approx 6.9$ (Никонов, 2000; Di Giacomo et al., 2018). Оценка максимально возможной магнитуды выполнена с учётом: (1) исторического максимума; (2) геометрии потенциально активных разломных сегментов длиной порядка 40–70 км; (3) современных скоростей деформаций и внутриплитного геодинамического режима [Wells, Coppersmith, 1994; Scholz, 2019].

Количественная оценка сопоставлялась с эмпирическими соотношениями между магнитудой и длиной разрыва [Wells, Coppersmith, 1994]: $M = a + b \cdot \log L$, где L – длина потенциально активного разломного сегмента. Для структур Южного берега Крыма ($L \approx 40\text{--}70$ км) получаем диапазон $M_w \approx 6.5\text{--}6.9$, согласующийся с параметрами событий 1927 г. Дополнительным ограничением служат современные относительные скорости деформаций порядка 3–4 мм/год, определённые по данным РСДБ, ЛЛС и ГНСС.

Низкие скорости современных деформаций соответствуют ограниченному темпам накопления тектонических напряжений и умеренному сейсмическому потенциалу региона. Неопределённость оценки $M_{\max}$ связана с ограниченной длительностью инструментального каталога, неполной определённой геометрии активных разломов и эпистемической неопределённостью эмпирических соотношений.

С учётом параметров Крымской серии 1927 г., размеров предполагаемых активных разломных структур и современных скоростей деформаций в качестве инженерной оценки для региона принят диапазон $M_{\max} \approx 6.8 \pm 0.2$. События с магнитудами

$M \geq 7.0$ в рамках рассматриваемой модели представляются маловероятными. Полученная оценка носит инженерно-геодинамический и полуэмпирический характер и не заменяет специализированных процедур определения $M_{\max}$ в рамках полного вероятностного сейсмического районирования.

Частота сильных землетрясений

Для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.5$ средняя частота повторяемости оценена как верхняя инженерная граница $\lambda_{6.5} \approx (6-8) \times 10^{-3} \text{ год}^{-1}$. Оценка учитывает вклад кластеризованной Крымской сейсмической серии 1927 г. и рассматривается как консервативная характеристика, используемая при оценке вероятностной сейсмической опасности. Соответствующий средний интервал повторяемости составляет 125–170 лет.

Вероятность превышения в течение периода T вычислялась в предположении стационарного пуассоновского процесса: $P(T) = 1 - e^{-\lambda T}$ [Cornell, 1968; McGuire, 2004; Gutenberg, Richter, 1944]. Для событий $M \geq 6.5$ получены следующие оценки вероятности превышения: 10 лет – 6–8 %; 30 лет – 16–21 %; 50 лет – 26–33 %.

Сценарные значения пиковых ускорений грунта (PGA) рассчитаны с использованием современных эмпирических зависимостей затухания (GMPE) для мелкофокусных коровых землетрясений активных континентальных областей [Boore et al., 2014; Campbell, Bozorgnia, 2014]. Дополнительное сопоставление с региональными GMPE для Крымско-Черноморского региона показало согласованность результатов в пределах эпистемической неопределённости моделей. Расчёты выполнены для гипоцентральных расстояний, соответствующих потенциальным сейсмогенерирующим зонам Южного берега Крыма и прилегающей акватории Чёрного моря.

Для сценария $M = 6.5$ в районе Ялты медианные значения PGA составляют 0.25–0.40 g, а для предельного сценария $M = 7.0$ возрастают до 0.45–0.65 g. Для района Севастополя соответствующие оценки ниже: 0.08–0.15 g ($M = 6.5$) и 0.18–0.30 g ($M = 7.0$), что связано с большими расстояниями до потенциальных очаговых зон и особенностями региональной тектонической структуры.

Условная годовая интенсивность превышения уровня $\text{PGA} > 0.3 \text{ g}$ для района Ялты оценивается как $\lambda_{0.3g} \approx 3.5 \times 10^{-3} \text{ год}^{-1}$, что соответствует вероятности около 16 % за 50 лет в рамках стационарной пуассоновской модели. Для района Севастополя вероятность превышения не превышает 5 % и определяется редкими экстремальными сценариями.

Представленные значения PGA соответствуют медианным оценкам; суммарная эпистемическая и алеаторная неопределённость составляет порядка $\pm 30-50 \%$. С учётом неопределённости параметров повторяемости диапазон $\lambda_{6.5} = (0.005-0.015) \text{ год}^{-1}$ приводит к вариации вероятности превышения $\text{PGA} > 0.3 \text{ g}$ за 50 лет от 6 до 18 %. Верхняя граница соответствует консервативному сценарию, тогда как более низкие значения согласуются с внутриплитным характером деформаций Крымского региона и низкими скоростями накопления тектонических напряжений.

Дискуссия

Сопоставление Южного берега Крыма с другими сейсмоактивными регионами Европы – Большим Кавказом, Балканами и зоной Вранча – показывает его принадлежность к областям умеренной внутриплитной сейсмичности. В отличие от Кавказа и Восточного Средиземноморья, где реализуются высокие скорости деформаций и протяжённые активные разломы [Reilinger et al., 2006; Mosar et al., 2022], Крымский регион характеризуется малыми относительными скоростями современных движений ($\approx 3-4 \text{ мм/год}$), отсутствием субдукции и ограниченными размерами активных разломных структур.

Полученные оценки согласуются с существующими сейсмотектоническими моделями региона [Пустовитенко и др., 1989; Sosson et al., 2017; Nikishin et al., 2015]. Оценка максимально возможной магнитуды $M_{\max} \approx 6.8 \pm 0.2$ соответствует параметрам Крымской серии 1927 г., геометрии активных разломов и современным геодинамическим ограничениям. Отсутствие крупных трансформных и субдукционных структур естественным образом ограничивает размеры возможных очаговых зон и верхний уровень реализуемых магнитуд.

Значения параметра b закона Гутенберга–Рихтера для инструментального периода ($b \approx 1.0$) типичны для слабodeформируемых внутриплитных областей. Более низкие значения для периода 1919–1957 гг. ($b \approx 0.6$) отражают влияние кластеризованной Крымской серии 1927 г. и повышенную долю сильных событий.

Интеграция данных РСДБ, ЛЛС и ГНСС позволяет использовать современные скорости деформаций как независимые кинематические ограничения при интерпретации параметров сейсмической опасности. Низкие скорости относительных движений согласуются с ограниченными темпами накопления тектонических напряжений и умеренным сейсмическим потенциалом региона.

Полученные результаты не противоречат существующим схемам ОСР Крыма и могут использоваться как дополнительный геодинамический контекст при уточнении региональных моделей сейсмической опасности. Несмотря на умеренный уровень современной сейсмичности, сочетание активных разломов, прибрежной урбанизации и инженерно-геологической уязвимости определяет значимость оценки возможных сильных землетрясений для Южного берега Крыма.

Выводы

В работе рассмотрены геодинамические ограничения параметров сейсмической опасности Крымского полуострова на основе совместного анализа сейсмологических и современных геодезических данных. Обработка РСДБ-, ЛЛС- и GNSS-наблюдений в системе ITRF2020 позволила уточнить современные кинематические характеристики региона. Абсолютная горизонтальная скорость движения составляет 34.2 ± 0.6 мм/год, тогда как относительная скорость относительно стабильной Евразии не превышает 3.5 ± 0.5 мм/год, что соответствует внутриплитному режиму деформаций.

Низкие относительные скорости ($\approx 3\text{--}4$ мм/год) и отсутствие выраженной локализации деформаций согласуются с ограниченной протяжённостью активных разломных структур и умеренным уровнем накопления тектонических напряжений.

Анализ закона Гутенберга–Рихтера показал значения параметра $b \approx 1.0$ для инструментального периода ($M_c = 3.0$), характерные для слабodeформируемых внутриплитных областей. Пониженные значения $b \approx 0.6$ для первой половины XX века связаны с кластеризацией событий Крымской серии 1927 г.

На основе сейсмологических, геометрических и геодинамических ограничений получена оценка максимально возможной магнитуды $M_{\max} \approx 6.8 \pm 0.2$. Для инженерных сценариев рассмотрен предельный вариант $M = 7.0$. Средняя частота событий с $M \geq 6.5$ оценивается как $\lambda_{6.5} \approx (6\text{--}8) \times 10^{-3}$ год $^{-1}$, что соответствует вероятности 26–33 % за 50 лет в рамках пуассоновской модели.

Полученные результаты показывают, что Южный берег Крыма относится к регионам умеренной сейсмической опасности, однако сочетание активных разломов, прибрежной урбанизации и инженерно-геологической уязвимости может приводить к существенным локальным последствиям сильных землетрясений.

Представленные оценки не являются самостоятельной схемой вероятностного сейсмического районирования и рассматриваются как дополнительные геодинамические ограничения при интерпретации параметров региональной сейсмической опасности.

Литература

1. Никонов А.А. Сейсмический потенциал Крымского региона: Сравнение региональных карт и параметров выявленных событий // Физика Земли. – 2000. – № 7. – С. 53–62.
2. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона. Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
3. Свалова В.Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 8–29. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36414.
4. Сим Л.А., Гордеев Н.А., Сычева Н.А. Неотектоника и современные напряжения Степного Крыма // Геосистемы переходных зон. – 2025. – Т. 9. № 4. – С. 345–360. DOI: 10.30730/grtz.2025.9.4.345-360.
5. Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1965. – No. 43. – pp. 237–239.
6. Akkar S., Bommer J.J. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East // Seismological Research Letters. – 2010. – No. 81(2). – pp. 195–206. DOI: 10.1785/gssrl.81.2.195.
7. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X., Metivier L., Chanard K. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions // Journal of Geodesy. – 2023. – No. 97. – Art. No. 47. DOI: 10.1007/s00190-023-01738-w.
8. Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E., Atkinson G.M. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5 % damped PSA for shallow crustal earthquakes // Earthquake Spectra. – 2014. – No. 30(3). – pp. 1057–1085. DOI: 10.1193/070113EQS184M.
9. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5 % damped spectral response // Earthquake Spectra. – 2014. – No. 30(3). – pp. 1087–1115. DOI: 10.1193/062913EQS175M.
10. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1968. – No. 58(5). – pp. 1583–1606. DOI: 10.1785/BSSA0580051583.
11. Di Giacomo D., Engdahl E.R., Storchak D.A. The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the extension project // Earth System Science Data. – 2018. – No. 10. – pp. 1877–1899. DOI: 10.5194/essd-10-1877-2018.
12. Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of earthquakes in California // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1944. – No. 34(4). – pp. 185–188. DOI: 10.1785/BSSA0340040185.
13. Nikishin A.M., Wannier M. et al. Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the Eastern Black Sea region. In: Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. (eds). Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus. Geological Society, London, Special Publications, 428. 2015. – pp. 1–XX. DOI: 10.1144/SP428.1.
14. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. New Catalogue of the strong earthquakes of the USSR from ancient times through 1977 // World Data Center A. Colorado, USA, – 1982.
15. Kreemer C., Blewitt G., Klein E.C. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2014. – No. 15. – pp. 3849–3889. DOI: 10.1002/2014GC005407
16. McGuire R.K. Seismic hazard and risk analysis // Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 2004. – 240 p.
17. Mosar J., Mauvilly J., Koiava K., Gamkrelidze I., Enna N., Lavrishev V., Kalberguenova V. Tectonics in the Greater Caucasus (Georgia – Russia): From an intracontinental rifted basin to a doubly verging fold-and-thrust belt // Marine and Petroleum Geology. – 2022. – No. 140. – Art. No. 105630. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105630.
18. Petrov L., Volvach A., Nesterov N. Measurements of horizontal motion of the station Simeiz using VLBI // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2001. – No. 17(5). – pp. 424–436.
19. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // Journal of Geophysical Research. – 2006. – No. 111. – B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.

20. Scholz C.H. The mechanics of earthquakes and faulting. 3rd Edition. Cambridge U.: Press. Cambridge, 2019. – 493 p. DOI: 10.1017/9781316681473.
21. Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. (eds). Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus. Geological Society. London, Special Publications. – 2017. – Vol. 428. – pp. 1–9. DOI: 10.1144/SP428.16.
22. Volvach A.E., Dmitrotsa A.I., Neyachenko D.I. Geodetic constraints on the seismic potential of the Crimean Peninsula // Infocommunications and Radio Technologies. – 2026. – Vol. 9(3). – pp. 397–416. DOI: 10.21227/35ys-cc94.
23. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1994. – No. 84. – pp. 974–1002.

References

1. Nikonov A.A. Seismic potential of the Crimean Region: comparison of regional maps and parameters of detected events. Physics of the Earth. 2000. No. 7. pp. 53–62. (In Russ.)
2. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Goryachun A.V. Earthquakes of the Crimean-Black Sea Region. Kiev. Naukova Dumka. 1989. 192 p. (In Russ.)
3. Svalova V.B. Geothermics and seismicity of the Caucasus region and inverse problem of geodynamics. Geology and Geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 77–93. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36485. (In Russ.)
4. Sim L.A., Gordeev N.A., Sycheva N.A. Neotectonics and modern stress field of the Steppe Crimea. Geosystems of Transitional Zones. 2025. Vol. 9. No. 4. pp. 1–18. DOI: 10.30730/gtrz.2025.9.4.345-360. (In Russ.)
5. Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. Bulletin of the Earthquake Research Institute. 1965. No. 43. pp. 237–239.
6. Akkar S., Bommer J.J. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East. Seismological Research Letters. 2010. No. 81(2). pp. 195–206. DOI: 10.1785/gssrl.81.2.195.
7. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X., Metivier L., Chanard K. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. Journal of Geodesy. 2023. No. 97. Art. No. 47. DOI: 10.1007/s00190-023-01738-w.
8. Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E., Atkinson G.M. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5 % damped PSA for shallow crustal earthquakes. Earthquake Spectra. 2014. No. 30(3). pp. 1057–1085. DOI: 10.1193/070113EQS184M.
9. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5 % damped spectral response. Earthquake Spectra. 2014. No. 30(3). pp. 1087–1115. DOI: 10.1193/062913EQS175M.
10. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America. 1968. No. 58(5). pp. 1583–1606. DOI: 10.1785/BSSA0580051583.
11. Di Giacomo D., Engdahl E.R., Storchak D.A. The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the extension project. Earth System Science Data. 2018. No. 10. pp. 1877–1899. DOI: 10.5194/essd-10-1877-2018.
12. Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America. 1944. No. 34(4). pp. 185–188. DOI: 10.1785/BSSA0340040185.
13. Nikishin A.M., Wannier M. et al. Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the Eastern Black Sea region. In: Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. (eds). Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus. Geological Society, London, Special Publications, 428. 2015. pp. 1–XX. DOI: 10.1144/SP428.1.
14. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. New Catalogue of the strong earthquakes of the USSR from ancient times through 1977. World Data Center A. Colorado. USA. 1982.
15. Kreemer C., Blewitt G., Klein E.C. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2014. No. 15. pp. 3849–3889. DOI: 10.1002/2014GC005407
16. McGuire R.K. Seismic hazard and risk analysis. Oakland, California. Earthquake Engineering Research Institute (EERI). 2004. 240 p.

17. Mosar J., Mauvilly J., Koiava K., Gamkrelidze I., Enna N., Lavrishev V., Kalberguenova V. Tectonics in the Greater Caucasus (Georgia – Russia): From an intracontinental rifted basin to a doubly verging fold-and-thrust belt. *Marine and Petroleum Geology*. 2022. No. 140. Art. No. 105630. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105630.
18. Petrov L., Volvach A., Nesterov N. Measurements of horizontal motion of the station Simeiz using VLBI. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2001. No. 17(5). pp. 424–436.
19. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research*. 2006. No. 111. B05411. DOI: 10.1029/2005JB004051.
20. Scholz C.H. *The mechanics of earthquakes and faulting*. 3rd Edition. Cambridge U. Press. Cambridge. 2019. 493 p. DOI: 10.1017/9781316681473.
21. Sosson M., Stephenson R.A., Adamia S.A. (eds). *Tectonic evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geological Society. London. Special Publications. 2017. Vol. 428. pp. 1–9. DOI: 10.1144/SP428.16.
22. Volvach A.E., Dmitrotsa A.I., Neyachenko D.I. Geodetic Constraints on the Seismic Potential of the Crimean Peninsula. *Infocommunications and Radio Technologies*. 2026. Vol. 9(3). pp. 397–416. DOI: 10.21227/35ys-cc94.
23. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. No. 84. pp. 974–1002.