



Неотектонические и современные напряжения Степного Крыма

Л. А. Сим, Н. А. Гордеев[®], Н. А. Сычева[®]

[®]E-mail: gord@ifz.ru; ivtran@mail.ru

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Резюме. В статье приведены данные о новейшей тектонике и сейсмичности Крымского полуострова. С использованием двух версий структурно-геоморфологического метода: мануального варианта и версии с программным обеспечением SimSGM – охарактеризовано новейшее напряженное состояние Степного Крыма и прилегающих территорий в связи с современной сейсмичностью полуострова. Выделены участки развития трещиноватости отрывного и сколового типов. Поле напряжений характеризуется сдвиговым типом с ориентировкой оси сжатия преимущественно северо-восточного направления и наименее проявленным сжатием северо-западного простирания. Рельеф и его основные особенности выражаются в виде неоднородностей с ортогональным простиранием для Степного Крыма и диагональным – для Горного Крыма. Полученные данные о распространении сколового и отрывного типов мегатрещин и сейсмичности необходимы для понимания развития опасных геологических процессов, а также полезны при проектировании гражданских сооружений и поиске рудных и нефтяных месторождений, поскольку блоки с отрывными трещинами более флюидопроницаемы и подвержены более интенсивному разрушению. Слабая сейсмическая активность, по-видимому, связана: во-первых, с малым количеством сейсмостанций, во-вторых, с разгрузкой накапливаемых в коре напряжений в акватории Черноморского бассейна.

Ключевые слова: Степной Крым, Крымский полуостров, неотектонические и современные напряжения, разломная тектоника, структурно-геоморфологический метод, программа SimSGM

Neotectonic and modern stresses of Steppe Crimea

Lidiya A. Sim, Nikita A. Gordeev[®], Nayla A. Sycheva[®],

[®]E-mail: gord@ifz.ru; ivtran@mail.ru

Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

Abstract. This article presents data on the neotectonics and seismicity of the Crimean Peninsula. Using two versions of the structural-geomorphological method – a manual version and a version with the SimSGM software – the neotectonic stress state of Steppe Crimea and adjacent territories was characterized in relation to the peninsula's current seismicity. Areas of fracture concentration of the tension and shear types were identified. The results show that the stress field is characterized by a strike-slip pattern, with a predominantly northeast-oriented compression axis and the least pronounced northwest-trending compression. The relief and its main features are expressed as heterogeneities with an orthogonal strike for Steppe Crimea and a diagonal strike for Mountainous Crimea. The obtained data on the distribution of shear and tension megafractures and seismicity are essential for understanding the formation of hazardous geological processes and are also useful in the design of civil structures and the exploration of ore and oil deposits, as blocks with tension fractures are more fluid-permeable and subject to more intense failure. The low seismic activity is likely due to, firstly, the small number of seismic stations and, secondly, the release of accumulated crustal stresses in the Black Sea basin.

Keywords: Steppe Crimea, Crimean Peninsula, neotectonic and modern stresses, fault tectonics, structural-geomorphological method, SimSGM program

Для цитирования: Сим Л.А., Гордеев Н.А., Сычева Н.А. Неотектонические и современные напряжения Степного Крыма. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 345–360. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.345-360>; <https://www.elibrary.ru/gwpjqd>

For citation: Sim L.A., Gordeev N.A., Sycheva N.A. Neotectonic and modern stresses of Steppe Crimea. *Geosistemy perekhodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 345–360. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.345-360>; <https://www.elibrary.ru/gwpjqd>

Финансирование

Работа выполнена в рамках госзадания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН на 2025–2027 гг. (FMWU-2025-0036, «Создание тектонофизической и геомеханической моделей коры и литосферы Крыма и Северного Причерноморья»).

Funding

The study was carried out within the framework of the state task of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences for 2025–2027 (FMWU-2025-0036, “Creation of tectonophysical and geomechanical models of the crust and lithosphere of Crimea and the Northern Black Sea region”).

Введение

Основанием Степного (равнинного) Крыма является молодая платформа, установленная М.В. Муратовым и названная им Скифской [1]. Новейший тектонический этап в равнинном Крыму начался в позднем олигоцене – раннем миоцене с накоплением глинистых толщ майкопской серии. Уже в это время существовали основные поднятия и прогибы, так как мощности пород этой серии различны в северной и восточной частях района и существенно отличаются от малых мощностей в центральной и южной частях. При этом основной импульс движений приходится на плиоцен-четвертичное время.

Разломной тектонике Крымского полуострова посвящены многочисленные работы [2–4 и др.]. Неотектоника района описана нами преимущественно по работам [5, 6], согласно которым в новейшей структуре равнинного Крыма выделяются четыре субширотные (точнее, ВСВ простирации) ступени – блоки. С севера на юг это Тарханкутско-Джанкойский, Новоселовский, Каламитско-Арабатский и Горно-Крымский блоки. Блоки разделены крупными линеаментами – разломами, которые хорошо дешифрируются как по топографической основе, так и на космических снимках. Исследователями названы разломы Каркинитско-Сивашский, Донузлавский, Евпаторийско-Нижнегорский и Луккульско-Каменский.

Каркинитско-Сивашский разлом ограничивает Крымский п-ов с запад-северо-за-

пада и отделяет крымские структуры от Восточно-Европейской платформы, он идеально совпадает с разломом, выделенным в работе [2]. Южнее Тарханкутско-Джанкойский блок ограничен крупным разломом субширотного простирания, который разделен на два сегмента. Западный сегмент – Донузлавский, восточный – Джанкойский. Вдоль Донузлавского разлома В.В. Гордиенко с соавторами отметили повышенный тепловой поток [7]. Все разломы подтверждаются геологическими и геофизическими данными [6], при этом в работе [2] выделена только Донузлавская часть разлома. Необходимо отметить, что между Каркинитско-Сивашским и Донузлавским разломами сейсмическими станциями в 1972–2023 гг. зафиксированы слабые землетрясения [8]. В Тарханкутско-Джанкойском блоке в центральной части выделяется сложно построенное Тарханкутское поднятие, а в восточной части блока выделен Сивашский прогиб. Значительную часть Новоселовского блока занимает Новоселовское поднятие. От Новоселовского блока Каламитско-Арабатский блок отделяет Евпаторийско-Нижнегорский разлом. Каламитско-Арабатский блок с юго-востока отделен от Горного Крыма Луккульско-Каменским разломом. Это наиболее южный блок Степного Крыма. В его пределах центральную часть блока занимает крупное Симферопольское поднятие, на западе выделен Альминский прогиб, а на востоке – Индоло-Кубанский прогиб. Вдоль юго-западной границы Крымского п-ова в море отчетливо

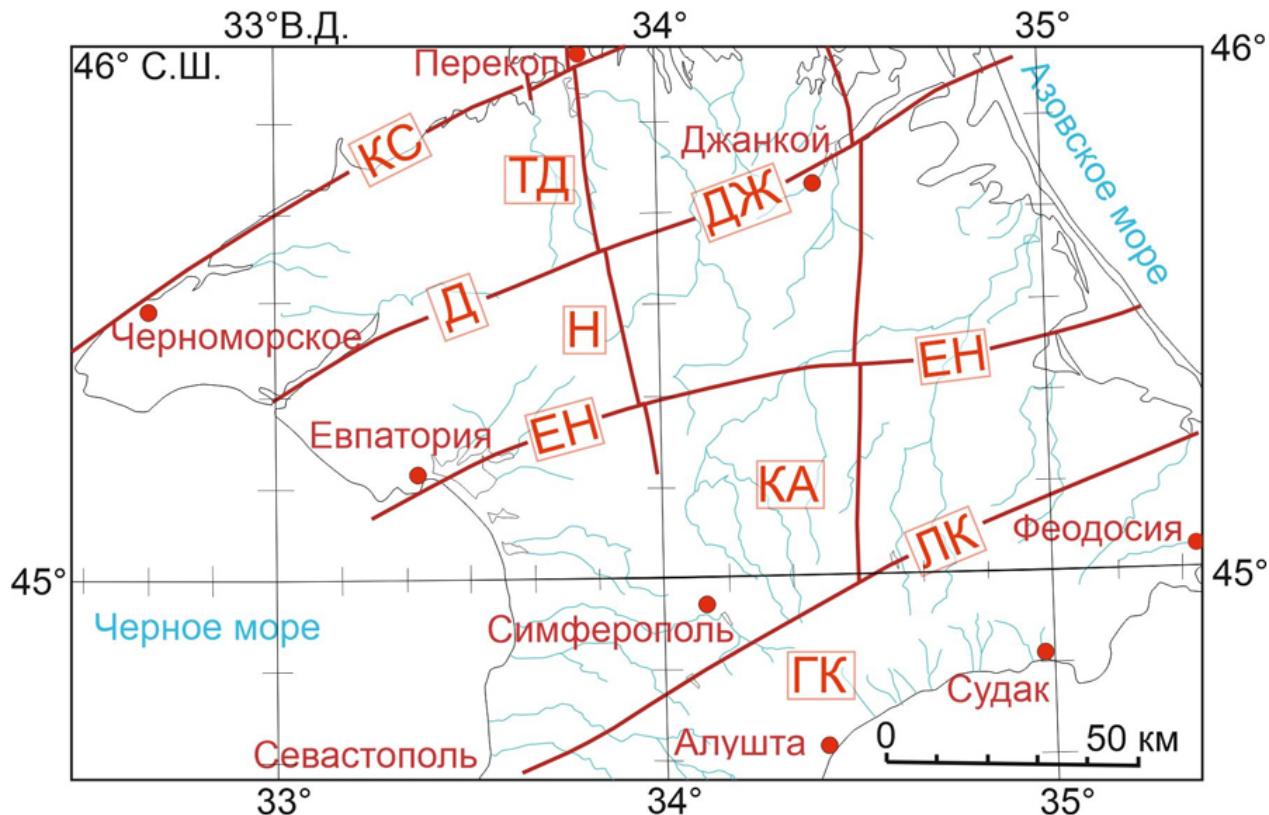


Рис. 1. Схема районирования разломов и отделяемых ими тектонических блоков [6, рис. 2 с упрощениями]. Красные линии – региональные разломы: КС – Каркинитско-Сивашский, Д – Донузлавский, ДЖ – Джанкойский, ЕН – Евпаторийско-Нижнегорский, ЛК – Луккульско-Каменский. Тектонические блоки: ТД – Тарханкутско-Джанкойский, Н – Новоселовский, КА – Каламитско-Арабатский, ГК – Горно-Крымский.

Fig. 1. The scheme of fault zoning and the tectonic blocks separated by these faults [6, Fig. 2 with simplifications]. Red lines indicate regional faults: KC, Karkinit-Sivash; D, Donuzlav; DJ, Dzhankoy; EH, Yevpatoria-Nizhnegorsk; LK, Lukkul-Kamen. Tectonic blocks: TD, Tarkhankut-Dzhankoy; H, Novoselovsky; KA, Kalamit-Arabat; GK, Mountain Crimean.

фиксируются две отрицательные структуры: Донузлавско-Войковский прогиб и южнее – Каламитский залив, которые значительно выдвинуты на восток-северо-восток вдоль разломов, анализируемых нами. Это дало основание исследователям неотектоники Степного Крыма определить разломы как левые сдвиги [6]. Для Керченского п-ова использованы разломы, выделенные в работе [9].

В данной статье поставлена задача охарактеризовать новейшее напряженное состояние Степного Крыма и прилегающих территорий в связи с современной сейсмичностью. Выделить участки развития трещиноватости отрывного и сколового типов. Данные о положении отрывов очень важны при строительстве гражданских и стратегических сооружений, поскольку сеть отрывной трещиноватости более флюидопроницаема, чем сколы.

Характеристика района исследования

Сейсмичность. Общий уровень сейсмичности Крымско-Черноморского региона несколько ниже, чем в пределах остальной части периферии Черного моря – на Кавказе, в Турции или Румынии, а периоды повторяемости сильных и катастрофических землетрясений здесь более длительные, чем в указанных регионах [10]. Тем не менее, для этой территории известны катастрофические исторические землетрясения [11]. Одно из современных – землетрясение 11 сентября 1927 г. $M = 6.9$. На рис. 2 представлено эпицентральное положение землетрясений исследуемого региона из каталога, собранного по данным следующих источников: ежегодники «Землетрясения Северной Евразии. Крымско-Черноморский

регион», 2014–2023 гг. (<http://www.gsras.ru/zse/contents.html>); Ученые записки Крымского Федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. 2011–2013 гг. (<https://sn-geography.cfuv.ru/archiv>); Сейсмологический бюллетень Украины за 1991–2010 гг. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 1995–2010 (Библиотека ИФЗ РАН). Землетрясения с 1927 по 1986 г. хорошо представлены в работе [12]. В целом источники включают более 3500 событий, произошедших с 1927 по 2023 г.

Для удобной оценки сейсмичности по Крымско-Черноморскому региону он условно разделен на 9 районов: 1 – Севастопольский; 2 – Ялтинский; 3 – Алуштинский; 4 – Судакско-Феодосийский; 5 – Керченско-Анапский; 6 – Степной Крым; 7 – Азово-Ку-

банский; 8 – Северо-Западный; 9 – Черноморская впадина. При анализе сейсмичности проведен статистический подсчет землетрясений по каждому из указанных районов. Степной Крым и примыкающие к нему берега в отношении землетрясений – спокойная зона. Но она испытывает медленное прогибание тылового характера. С ним связано формирование нефтяных и газовых месторождений.

С 1972 по 2023 г. на территории Степного Крыма зарегистрировано 41 землетрясение с $K_{II} = 4.7–9.0$ (K_{II} – класс землетрясения по Пустовитенко и Кульчицкому, $M = 0.7–3.1$, $mb = -0.3–2.7$ [16]). В тектоническом отношении часть эпицентров землетрясений приурочена к зоне сочленения Скифской плиты и Украинского щита и к раннекиммерийскому

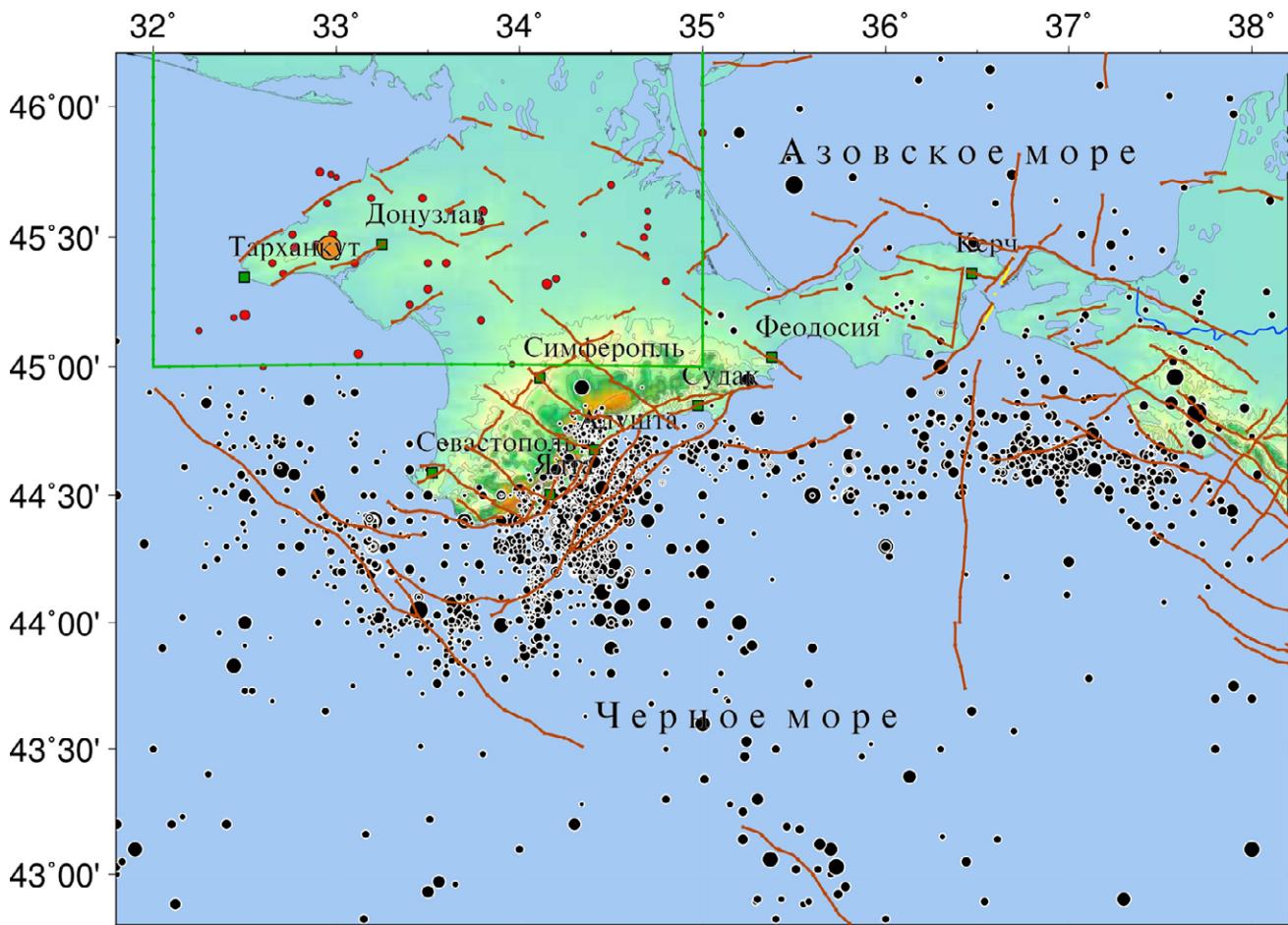


Рис. 2. Положение эпицентров из каталога землетрясений Крымско-Черноморского региона (более 3500 событий, 1927–2023 гг.). Прямоугольником отмечена территория Степного региона. Землетрясения на территории Степного Крыма показаны красными кружками. Кружок оранжевого цвета – положение населенного пункта Внуково (см. текст ниже). Коричневые линии – разломы по [2].

Fig. 2. Epicenter locations from the Crimean-Black Sea region earthquake catalog (over 3500 events, 1927–2023). The rectangle marks Steppe Crimea. The red dots denote earthquakes in Steppe Crimea. The orange dot marks the location of Vnukovo, near which the underground gas storage facility is located. Brown lines indicate faults according to [2].

Северотарханкутскому разлому. Другие цепочки и сгущения эпицентров попадают в зону влияния раннекиммерийских разломов: Донузлавского и Сулинско-Крымского. Землетрясения в районе Глебовского ПХГ (подземное хранилище газа, природный резервуар большой емкости до 2 млрд м³, залегающий на глубине 940 м; ближайший населенный пункт Внуково, см. рис. 1) могут быть связаны как с естественными сейсмотектоническими процессами в зонах ближайших разрывных нарушений, проявившихся в позднеальпийский этап, так и с наведенной сейсмичностью [8]. Очаги всех показанных на рисунке землетрясений Степного Крыма расположены в земной коре на глубинах от 5 до 25 км [8]. Самое значимое из них ($K_{\Pi} = 9.0$, $M = 3.1$) произошло 28 октября 1979 г.

Статистический анализ сейсмичности Крымско-Черноморского региона показывает, что район Степного Крыма относится к менее сейсмически активным (0.8 землетрясения в год в период с 1972 по 2023 г.), где представительные для всего региона землетрясения с $K_{\Pi} = 9$ не отмечены с 1979 г., т. е. за последние 40 лет. В то же время часть более слабых сейсмических толчков с $K_{\Pi} = 8$, представительных для отдельных районов изучаемой территории [17], и с $K_{\Pi} \leq 7$ удалось зафиксировать сравнительно удаленными стационарными станциями на пределе их регистрационных возможностей [8]. На территории Степного Крыма установлено две сейсмические станции: в районе Тарханкут (год открытия – 2012, временно закрыта в мае 2022 г.) и Донузлав (год открытия – 2018). Основная часть сейсмических станций для мониторинга сейсмического процесса Крымско-Черноморского региона установлена вдоль береговой линии южного побережья Крыма.

Тектоника. Черное море расположено в Анатолийском секторе Альпийско-Гималайской орогенной системы. В этом регионе движущиеся на север Африканская и Аравийская плиты сталкиваются с Евразийской плитой. В результате этого столкновения Анатолийский блок смещается на запад, а полюс вращения находится примерно к северу от Синайского полуострова. Тектонические стили

и скорости в окружении Черного моря и вдоль Крыма изучены недостаточно. Одна крымская станция ГНСС – CRAO (Крымская астрофизическая обсерватория), входящая в сеть IGS (International GNSS Service), не может обеспечить базу для детального геодинамического исследования полуострова. Однако можно отметить, что в многочисленных работах по исследованию активной тектоники Черного моря с помощью ГНСС-технологий [15–18] вектор скорости движений пункта CRAO имеет устойчивое северо-восточное направление. Поверхность Земли на участке спутникового геодинамического пункта CRAO (за период наблюдений в 6 лет 3 мес. и 17 дней, т.е. с 01.01.2012 по 17.04.2018 г.) движется в горизонтальной плоскости относительно станции ZECK (Зеленчукская), но при этом испытывает весьма незначительное погружение со скоростью 0.23 мм/год [19].

Методы исследований

Неотектонические напряжения Степного Крыма реконструированы структурно-геоморфологическим методом, как в классическом – мануальном исполнении, так и в его автоматизированной и улучшенной версии, реализованной в программном обеспечении SimSGM [20, 21].

Структурно-геоморфологический (СГ) метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений [23–26] основан на данных о закономерной ориентировке разрывов оперения в зоне динамического влияния сдвига, обобщенных в работе М.В. Гзовского, который выделил четыре типа (варианта) оперяющих трещин в зоне сдвига [24]. Оперяющие трещины формируют триаду закономерно ориентированных относительно разлома (сдвига) и относительно друг друга сопряженных сколов и отрывов (система из R- и R'-сколов в параллелизме с отрывами). Так как СГ-метод использует результаты дешифрирования топокарт, аэрофото- и космических снимков, то возраст восстановленных СГ-методом тектонических напряжений считается неотектоническим. Необходимо отметить, что в отдельных случаях

допускается, что оси сжатия и промежуточная ось могут меняться местами, когда доминирует обстановка растяжения. СГ-метод использован для реконструкции неотектонических напряжений III ранга по топографической основе [25] и космическому снимку (maps-for-free.com).

Алгоритмы программы SimSGM. Программное обеспечение SimSGM [20, 21] написано на языке программирования Python для операционных систем Windows 10 и Window 11. В основе работы программы лежит технология компьютерного зрения, с помощью которой происходит пошаговый анализ пикселей исходного изображения. В качестве основы для анализа могут послужить как карты высот, так и спутниковые снимки или их более мелкомасштабные аналоги (ортофотопланы крупного масштаба), сфотографированные беспилотными воздушными судами [26], т.е. беспилотными летательными аппаратами. Как и в базовом методе ручного дешифрирования [23], в программе SimSGM предусмотрен поиск и анализ мегатрещин с дальнейшим анализом их характерного взаимного расположения в области разломов, что в итоге дает нам информацию о локальных напряженных состояниях, кинематике по разломам и сложных геодинамических обстановках (транстенсии и транспрессии). Программа использована для реконструкции неотектонических напряжений I и II рангов.

Работа программы организована в три основных этапа. Первый – это загрузка и предварительная обработка карты высот или космоснимка, второй – дешифрирование линеаментов, третий – анализ напряженного состояния по М.В. Гзовскому [24].

Для анализа рельефа на предмет разделения мегатрещин на отрывы и сколы разного масштаба был проведен визуальный подбор параметров предобработки карты высот с намеренным отдельным определением крупномасштабных и мелкомасштабных линеаментов на этапе формирования «скелета» рельефа. Этап предварительной подготовки снимков к автоматическому дешифрированию позволяет в относительных координатах (относительно пикселей снимка) «подсвечивать» блоки нужного размера и тем самым определять структуры разного ранга. Однако это требу-

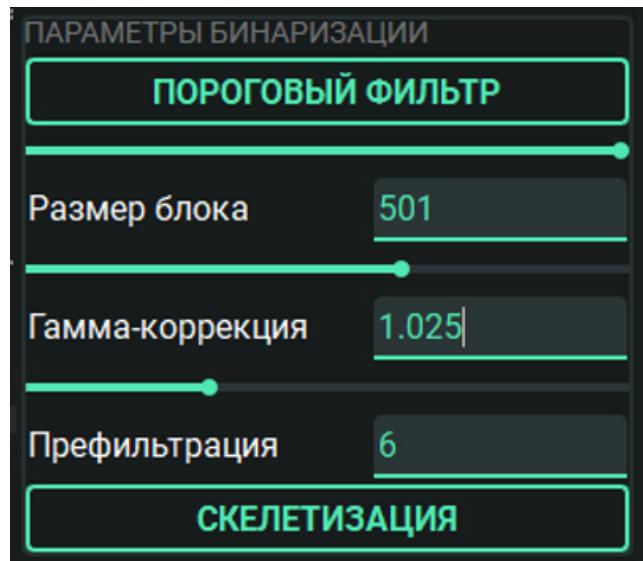


Рис. 3. Блок из ПО SimSGM по предварительной подготовке изображения к дешифрированию (параметры бинаризации исходного изображения).

Fig. 3. Block from the SimSGM software for preliminary preparation of an image for decoding (binarization parameters of the original image).

ет внимательности оператора во время подбора параметров бинаризации изображения. На рис. 3 изображены параметры бинаризации и скелетизации изображения в ПО SimSGM, где пороговый фильтр выделяет контрастные структуры с предварительным выравниванием яркости изображения.

Эта процедура задается тремя параметрами: размер блока – характерный размер неоднородностей в пикселях, яркость которых нужно выровнять; гамма-коррекция – изменение исходного контраста; префильтрация – размытие на краях контрастных областей по медиане.

Результаты и обсуждение

Реконструкции неотектонических напряжений по топографической основе

Полученные реконструкции неотектонических напряжений привязаны к схеме тектонического строения Крымского п-ова [27] (рис. 4). В работе [27] выделяются три структуры первого ранга: Украинская плита, Скифская плита, Горнокрымский террейн. С точки зрения геоморфологии большая часть Скифской плиты в исследуемом регионе представлена впа-

динами, Украинская плита – равниной, а Горнокрымский террейн – крупным поднятием.

СГ-методом для Степного Крыма восстановлены неотектонические напряжения по топографической основе (Карта Генерального штаба СССР. 1986. Лист L-36, Симферополь, м-б: 1:1 000 000) и космическому снимку. Результаты дешифрирования и реконструкции напряжений отражены на цифровой модели рельефа (рис. 5).

На рис. 5 показаны оси сжатия в горизонтальной плоскости, восстановленные СГ-методом по топографической основе. Поскольку по топографической основе в качестве мегатрещин вблизи выделенных разломов отдешифрировано незначительное число элементов рельефа, то определено лишь малое число ориентировок осей сжатия. Все они имеют северо-восточную ориентировку, при этом два определения вблизи Донузлавского прогиба свидетельствуют об обстановке дополнительного растяжения, что хорошо коррелирует с образованием прогиба в этом месте.

На рис. 5 показаны оси сжатия в горизонтальной плоскости, восстановленные СГ-методом по топографической основе. Поскольку по топографической основе в качестве мегатрещин вблизи выделенных разломов отдешифрировано незначительное число элементов рельефа, то определено лишь малое число ориентировок осей сжатия. Все они имеют северо-восточную ориентировку, при этом два определения вблизи Донузлавского прогиба свидетельствуют об обстановке дополнительного растяжения, что хорошо коррелирует с образованием прогиба в этом месте.

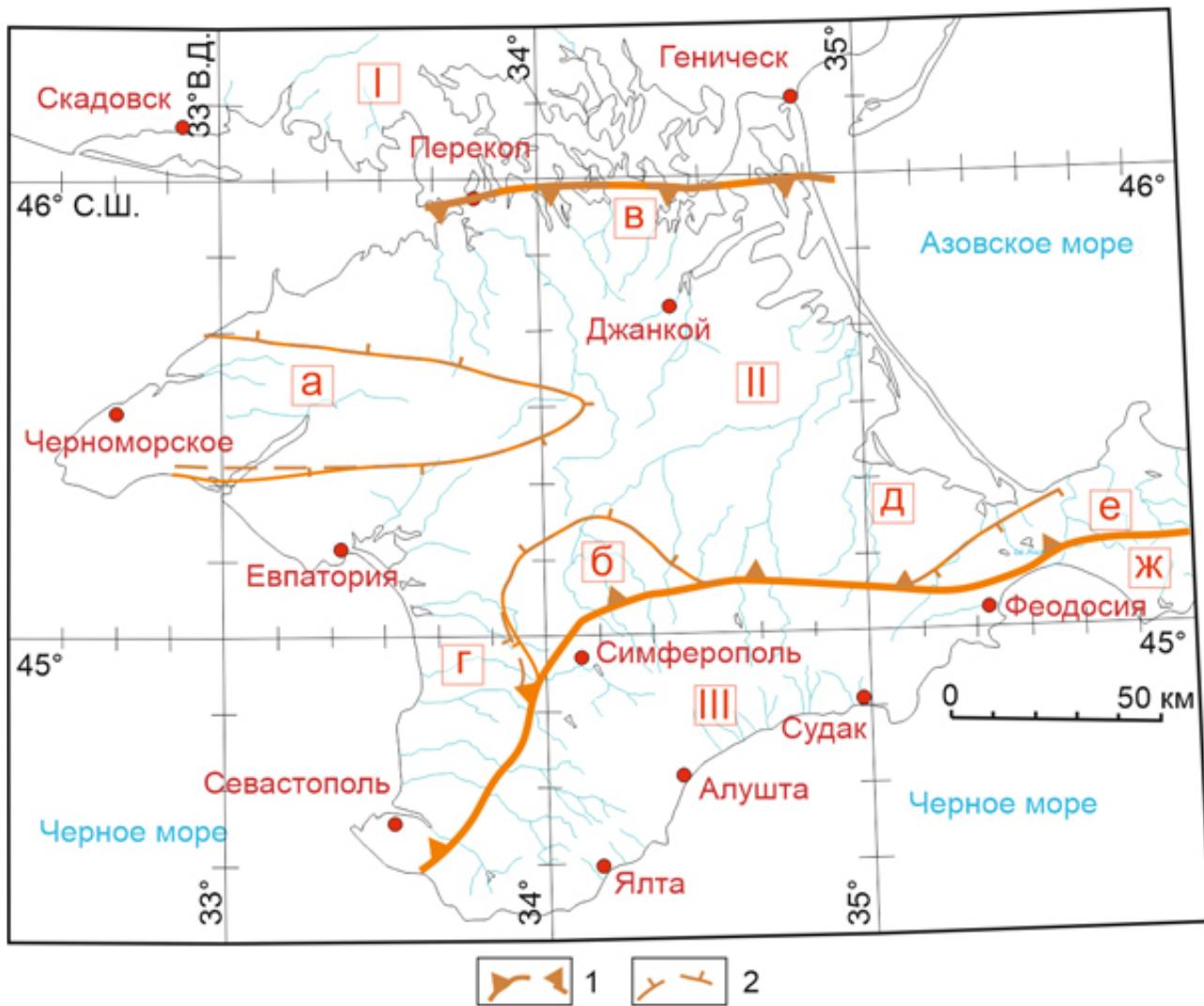


Рис. 4. Схема тектонического строения Крымского полуострова. 1 – границы тектонических структур I порядка [27]: I – Украинская плита ($PZ_{2,3}$); II – Скифская плита (PZ_3); III – Горнокрымский террейн, или Горнокрымская складчато-надвиговая область (T_3-J-K_1+N-Q). 2 – границы тектонических структур II ранга [27]: а – Тарханкутско-Новоселовское поднятие (N_2-Q); б – Симферопольское поднятие ($K-N$); в – Каркинитский прогиб ($N-Q$); г – Альминская впадина ($P-N$); д – Индоло-Кубанский прогиб ($P-N$); е – Северокерченская ретронадвиговая зона ($N-Q$); ж – Южнокерченская надвиговая зона ($N-Q$).

Fig. 4. Scheme of the tectonic structure of the Crimean Peninsula. 1, boundaries of tectonic structures of the first rank [27]: I, Ukrainian plate ($PZ_{2,3}$); II, Scythian plate (PZ_3); III, Mountain Crimean terrane i.e. the Mountain Crimean fold-and-thrust region (T_3-J-K_1+N-Q). 2, boundaries of tectonic structures of the 2nd rank [27]: (a) Tarkhankut-Novoselovsky uplift (N_2-Q); (б) Simferopol uplift ($K-N$); (в) Karkinitskiy trough ($N-Q$); (г) Alma depression ($P-N$); (д) Indolo-Kuban trough ($P-N$); (е) North Kerch retrothrust zone ($N-Q$); (ж) South Kerch thrust zone ($N-Q$).

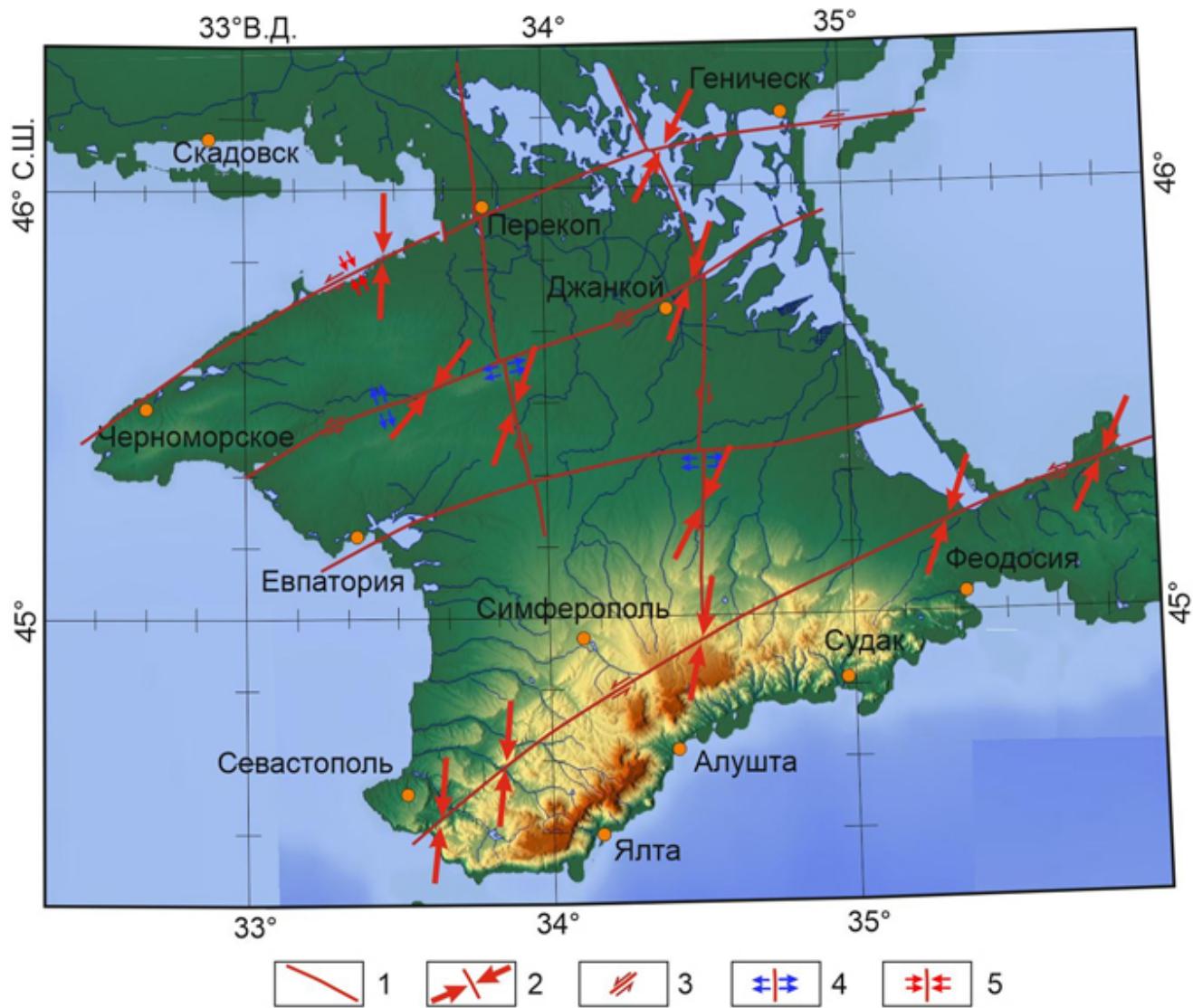


Рис. 5. Неотектонические напряжения Степного Крыма по цифровой карте рельефа (основа взята с сайта maps-for-free.com). 1 – разломы; 2 – ориентировки оси сжатия; 3 – направление сдвиговой подвижки по разлому; 4 – обстановка дополнительного растяжения; 5 – обстановка дополнительного сжатия.

Fig. 5. Neotectonic stresses of Steppe Crimean according to the digital relief map (base for the map is taken from website maps-for-free.com). 1, faults; 2, orientations of the compression axis; 3, direction of strike-slip movement along the fault; 4, additional extension (transtension); 5, additional compression (transpression).

Анализ крупномасштабных тектонических нарушений с помощью ПО SimSGM

Детальное дешифрирование мегатрещин проведено с помощью блока программы SimSGM, связанного с подготовкой изображений к процессу дешифрирования. Для обработки была взята карта рельефа высот SRTM из свободных источников (https://opendem.info/srtm_download_contours/). Данная цифровая модель рельефа (ЦМР) позволяет определять линеаменты по всем направлениям измерения

длин от 30 м и более. Чтобы получить полную картину неотектоники Степного Крыма, в ПО SimSGM был проанализирован весь Крымский полуостров, в том числе распределение линеаментов, имеющих протяженность от 500 до 10 000 м.

Для выделения линеаментов первого порядка проделана «бинаризация» рельефа (рис. 6) с параметрами предобработки изображения (см. рис. 3). «Подсветились» самые крупные линейные формы полуострова, которые выстраиваются в классический рисунок диагональных и ортогональных долин

рек, ущелий и каньонов. По рис. 5 видно, что Степной Крым в западной части разбит крупными долинами рек субширотного простирания, в центральной части – ортогональной системой рек и нарушений, в восточной – долинами рек северо-восточного простирания. Для южного берега Крыма (ЮБК) характерен рельеф, образующий диагональную систему неоднородностей, с крупными линеаментами северо-восточного простирания и серией пересекающих их линеаментов северо-западного простирания. Однако ближе к восточной части ЮБК происходит переориентация неоднородностей на ортогональную систему, после чего на самом восточном участке (Керченский п-ов) снова начинает доминировать диагональная система неоднородностей.

Результаты определения линеаментов первого и второго порядка приведены на рис. 7. Для визуального, качественного анализа рельефа в ПО SimSGM добавлены 3 розы-диаграммы. Их можно настроить на отображение по количеству или по длине объектов. Верхняя роза-диаграмма отображает простирания сколовых нарушений, средняя (трещины) – одновременно все типы (и сколы и отрывы), нижняя – только отрывы. Под каждой розой-диаграммой приведена шкала с заполнением, где вся шкала – это 100 % нарушений, а заполнение показывает, какова доля сколов и отрывов на дешифрируемой территории.

При анализе линеаментов первого порядка (рис. 7 А) установлено, что строго прямолинейные линеаменты, интерпретируемые в СГ-методе как сколовые мегатрещины, доминируют в двух максимумах – субмеридионального и субширотного простираний, что видно на розе-диаграмме светло-зеленого цве-

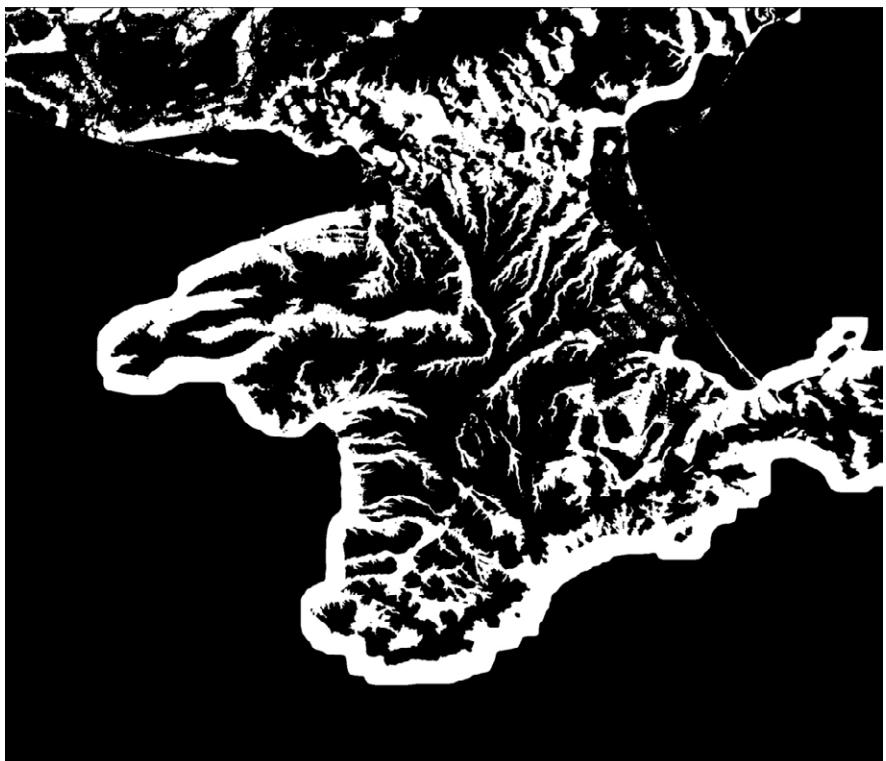


Рис. 6. Бинаризованное изображение Крымского п-ова для определения линеаментов первого порядка.

Fig. 6. Binarized image of the Crimean Peninsula for determining first rank lineaments.

та. Отрывные нарушения, соответствующие в рельефе широким и извилистым элементам, например каньоны и меандрирующие участки рек, также имеют два максимума. Первый ориентирован в северо-восточном простирании, а второй в северо-западном. Такое распределение сколов и отрывов (рис. 7 А, синяя роза-диаграмма) означает, что для полуострова существует два диагональных направления регионального сжатия, при этом северо-восточное сжатие преобладает.

При детальном изучении рис. 7 А можно заметить, что линеаменты имеют разные оттенки – зеленый и синий. Первый связан со сколовыми нарушениями, а второй с отрывными. По характеру распределения этих линеаментов установлено, что в регионе центрального Крыма и всего Степного Крыма доминирует северо-восточное сжатие, в то время как в распределении отрывных нарушений на южном берегу Крыма незначительно преобладает северо-западное сжатие. По-видимому, это связано с направлением новейшей складчатости в зоне Горного Крыма, его куэсты имеют как раз северо-западное падение. Эти следы

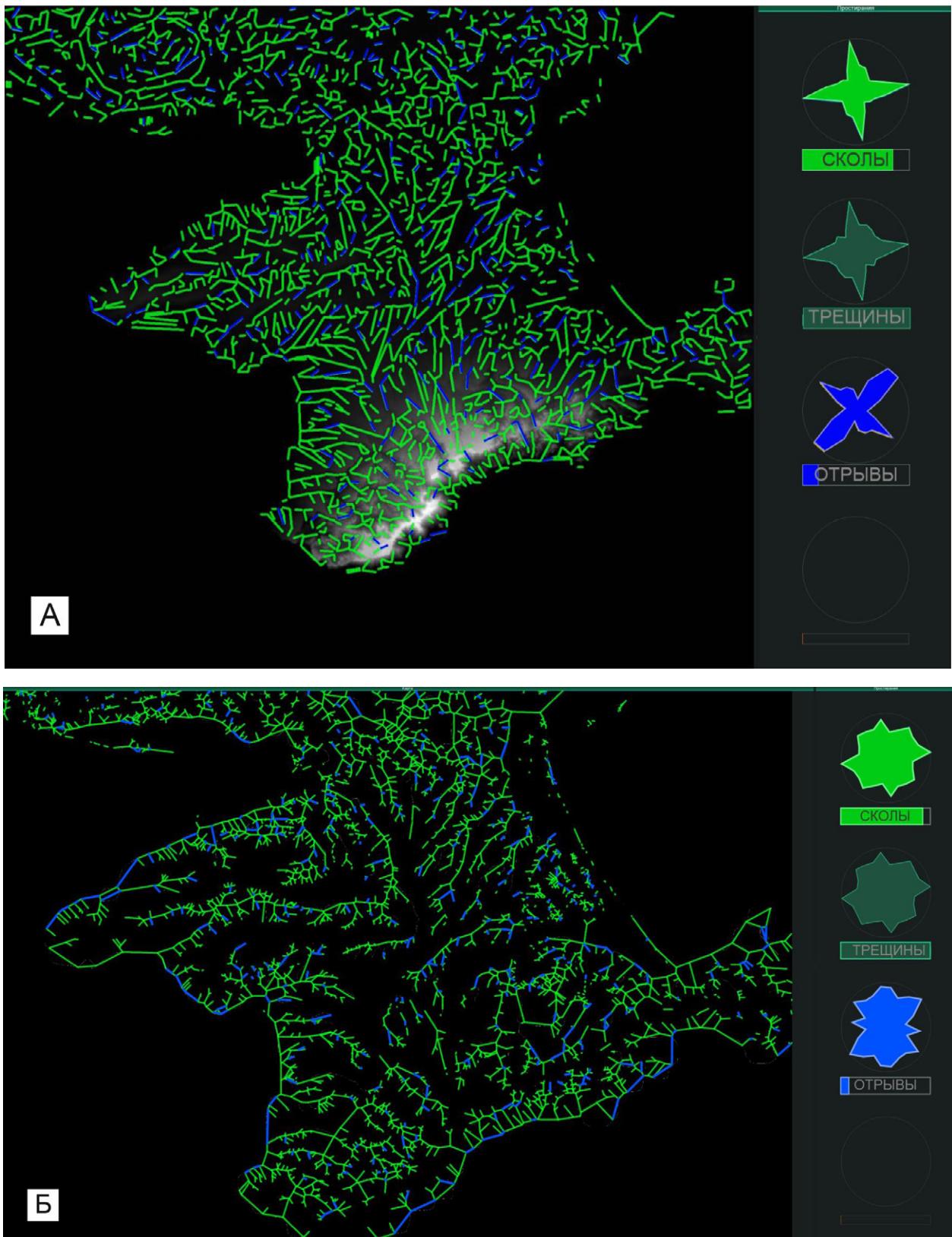


Рис. 7. Результаты дешифрирования линеаментов первого ранга (протяженностью от 1 до 10 км) (А) и линеаментов второго ранга (протяженностью от 0,5 до 10 км) (Б). Розы-диаграммы: светло-зеленая – мегатрешины сколового типа, зеленая – трещины (сводная информация по сколам и отрывам), синяя – мегатрешины отрывного типа.

Fig. 7. Results of deciphering first-rank lineaments (from 1 to 10 km in length) (A) and second-rank lineaments (from 0.5 to 10 km in length) (B). Rose diagrams: light green denotes shear megafractures; dark green denotes all shear and tension fractures; blue denotes tension fractures.

тектонической активизации удалось зарегистрировать с помощью алгоритмов SimSGM.

При повышении детальности дешифрирования и уменьшении нижнего порога линейных размеров искомых линеаментов до 500 м получена сходная картина распределения мегатрещин сколового и отрывного типов (рис. 7 Б). Для линеаментов второго ранга сколового типа добавилось два максимума по диагональной системе неоднородностей с сохранением пиковых значений по ортогональной системе неоднородностей (рис. 7 Б, светло-зеленая роза-диаграмма). Для линеаментов

второго ранга отрывного типа (синяя роза-диаграмма) проявился принципиально новый максимум субмеридионального простирания. По-видимому, большинство мегатрещин отрывного типа второго ранга, образовавшихся в процессе позднего развития разломной системы, оказались подчинены дальнодействующим силам в локальных областях крупных тектонических нарушений.

По данным о тектоническом строении Крымского п-ова [27] была построена карта новейших тектонических напряжений в привязке к его тектоническому строению (рис. 8).

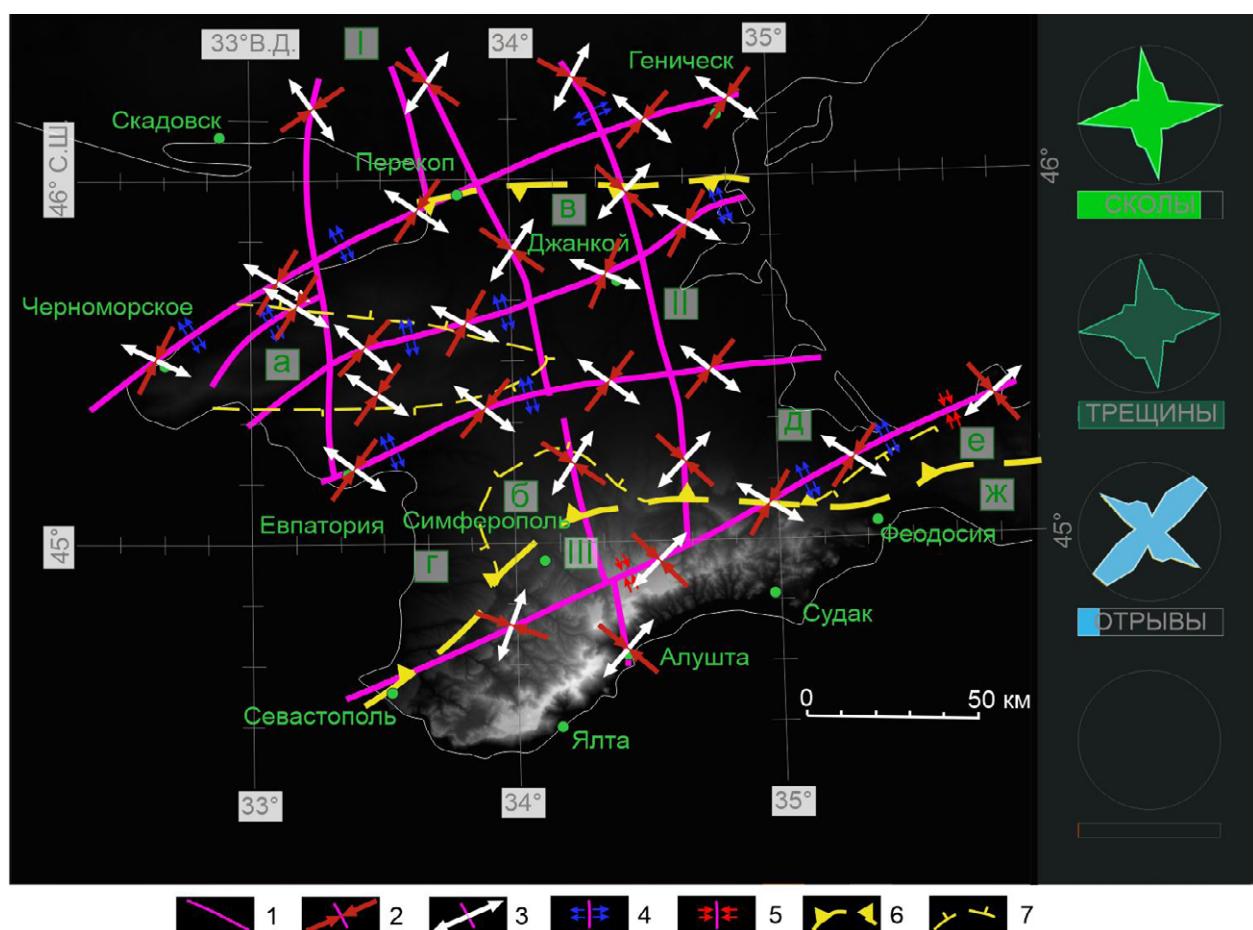


Рис. 8. Новейшие тектонические напряжения, рассчитанные в ПО SimSGM. 1 – разломы [6]; 2 – оси сжатия; 3 – оси растяжения; 4 – дополнительное растяжение (транстенсия); 5 – дополнительное сжатие (транспрессия); 6 – границы тектонических структур I порядка [27]: I – Украинская плита ($PZ_{2,3}$); II – Скифская плита (PZ_3); III – Горнокрымский террейн, или Горнокрымская складчато-надвиговая область ($J-K_1+N-Q$); 7 – границы тектонических структур II ранга [27]: а – Тарханкутско-Новоселовское поднятие (N_2-Q); б – Симферопольское поднятие ($K-N$); в – Каркинитский прогиб ($N-Q$); г – Альминская впадина ($P-N$); д – Индоло-Кубанский прогиб ($P-N$); е – Северокерченская ретронадвиговая зона ($N-Q$); ж – Южнокерченская надвиговая зона ($N-Q$).

Fig. 8. The latest tectonic stresses calculated in the SimSGM software. 1, faults [6]; 2, compression axes; 3, extension axes; 4, additional extension (transtension); 5, additional compression (transpression); 6, boundaries of tectonic structures of the first rank [27]: I, Ukrainian plate ($PZ_{2,3}$); II, Scythian plate (PZ_3); III, Mountain Crimean terrane, i.e. the Mountain Crimean fold-and-thrust region ($J-K_1+N-Q$); 7, boundaries of tectonic structures of the second rank [27]: (a) Tarkhankut-Novoselovsky uplift (N_2-Q); (б) Simferopol uplift ($K-N$); (в) Karkinitsky trough ($N-Q$); (г) Alma depression ($P-N$); (д) Indolo-Kuban trough ($P-N$); (е) North Kerch retrothrust zone ($N-Q$); (ж) South Kerch thrust zone ($N-Q$).



Рис. 9. Плотность отрывных (А) и сколовых (Б) нарушений, вычисленная в ПО SimSGM. 1 – границы тектонических структур I порядка [27]: I – Украинская плита ($PZ_{2,3}$); II – Скифская плита (PZ_3); III – Горнокрымский террейн, или Горнокрымская складчато-надвиговая область ($J-K_1+N-Q$). 2 – границы тектонических структур II ранга [27]: а – Тарханкутско-Новоселовское поднятие (N_2-Q); б – Симферопольское поднятие ($K-N$); в – Каркинитский прогиб ($N-Q$); г – Альминская впадина ($P-N$); д – Индоло-Кубанский прогиб ($P-N$); е – Северокерченская ретронадвиговая зона ($N-Q$); ж – Южнокерченская надвиговая зона ($N-Q$). 3 – мегатрещины: отрывы (А) и сколы (Б).

Fig. 9. Density of tension (A) and shear faults (B) calculated in the SimSGM software. 1, boundaries of tectonic structures of the first order [27]: I, Ukrainian plate ($PZ_{2,3}$); II, Scythian plate (PZ_3); III, Mountain Crimean terrane, i.e. the Mountain Crimean fold-and-thrust region ($J-K_1+N-Q$). 2, boundaries of tectonic structures of the second rank [27]: (a) Tarkhankut-Novoselovsky uplift (N_2-Q); (б) Simferopol uplift ($K-N$); (в) Karkinitsky trough ($N-Q$); (г) Alma depression ($P-N$); (д) Indolo-Kuban trough ($P-N$); (е) North Kerch retrothrust zone ($N-Q$); (ж) South Kerch thrust zone ($N-Q$). 3, megacracks: breaks/tension fractures (A) and shear fractures (B).

В результате автоматического дешифрирования установлено, что для всего Крымского п-ова простирание осей сжатия в основном северо-восточное. Это совпадает с результатом ручного дешифрирования (см. рис. 5). Однако для территории западного Горнокрымского террейна (рис. 8) есть расхождения в определениях в связи со сложностью рельефа: оси сжатия при ручном дешифрировании восстановлены с простиранием на СВ, а в компьютерной версии СГ-метода получен результат с СЗ простиранием осей сжатия. Такой же вывод сделан и в работе [27].

Выше в статье отмечена такая особенность этой части Крымского п-ова, как преобладание неоднородностей рельефа диагональных простираций. По-видимому, такая переиндексация напряжений на едином региональном разломе связана с комбинацией сдвига со взбросом. То есть при глобальной подвижке блоков в юго-запад-северо-восточном простирации центральная и северо-восточная части Горнокрымского террейна создают тень давления для небольшого западного массива пород этого террейна. Также установлено, что всей территории Скифской плиты в регионах впадин и прогибов свойственна повсеместная транстенсия (рис. 8, условные обозначения под пунктом 4). Кроме того, видно, что региональные разломы делятся на два глобальных ранга. Субширотные разломы – первого ранга, они подвержены воздействию северо-восточного регионального сжатия, а субмеридиональные разломы – второго ранга, подвержены воздействию северо-западного сжатия.

Для более глубокого анализа тектонических структур построены карты плотностей мегатрещин разного типа (рис. 9). Мегатрещины отрывного типа сосредоточены в основном на территориях Скифской плиты в областях развивающихся впадин и прогибов (рис. 9 А). В то время как сколовые нарушения проявлены в основном на территориях крупных поднятий и Горного Крыма (рис. 9 Б, III). Интересно, что большая концентрация прямолинейных элементов рельефа (с малой кривизной) наблюдается в том числе на территории Каркинитского прогиба, где большинство крупных водоемов имеют линейно вытянутые диагонально рас-

сеченные берега. Вся территория подвержена растягивающим напряжениям и разбита узловыми точками разломов.

Заключение

Вдоль крупнейших разломов восток-северо-восточного простирания структурно-геоморфологическим методом реконструированы ориентировки осей сжатия первого ранга северо-восточного простирания, за исключением Евпаторийско-Нижнегорского разлома, разделяющего Степной и Горный Крым. Предположительно, такие ориентировки осей сжатия обусловлены надвиганием Горного Крыма на Степной Крым. Большинство региональных разломов имеет слабую сейсмическую активность, что, по-видимому, связано, во-первых, с малым количеством сейсмостанций, во-вторых, с разгрузкой накапливаемых в коре напряжений в акватории Черноморского бассейна.

С помощью ПО SimSGM установлено несколько важных результатов:

1. На территории Крыма в большинстве своем развиты напряжения с ориентировками осей сжатия в северо-восточном простирации.
2. Региональные разломы разделяются на два ранга: субширотные – первого ранга, субмеридиональные – второго ранга.
3. Мегатрещины первого порядка образуют парагенез сколов и отрывов, создающий условия для развития регионального сжатия северо-восточного простирания.
4. Мегатрещины второго порядка формируют более сложную картину, в которой равнозначно выступают парагенезы северо-восточного и северо-западного простирания региональных сжимающих напряжений.
5. Мегатрещины первого порядка распределяются относительно тектонических структур так, что отрывы в основном тяготеют к зонам прогибов и впадин, а сколы – к складчатым структурам и поднятиям.
6. Геоморфологический «рисунок» Крымского региона позволяет разделить его на неотектонически разные области, где хорошо выделяются зоны неоднородностей с ортогональным простиранием для Степного Крыма и диагональным – для Горного Крыма.

Список литературы

- Геология СССР. 1969. Т. 8. Крым. Ч. I. Геологическое описание. М.: Недра, 576 с.
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. 2017. База данных активных разломов Евразии. *Геодинамика и тектонофизика*, 8(4): 711–736. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>
- Овсяченко А.Н., Вакарчук Р.Н., Корженков А.М., Ларьков А.С., Сысолин А.И., Рогожин Е.А., Мараханов А.В. 2019. Активные разломы Керченского полуострова: новые результаты. *Доклады Академии наук*, 488(4): 408–412. doi:10.31857/S0869-56524884408-412
- Вольфман Ю.М. 2021. Особенности процессов альпийского тектонического разрываообразования и сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона: дис. ... д-ра геол.-минер. наук, 371 с. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва.
- Кац Я.Г., Макарова Н.В., Козлов В.В., Трофимов Д.М. 1981. Структурно-морфологический анализ Крыма по дешифрированию космоснимков. *Изв. вузов. Геология и разведка*, 3: 8–20.
- Макарова Н.В., Макеев В.М., Галицкая И.В., Суханова Т.В. 2018. Новейшая тектоника равнинного Крыма в связи с проблемами его водоснабжения. *Бюл. Московского общества испытателей природы. Отд. геол.*, 93(3): 3–11.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. 2015. Современная активизация и тепловое поле Южно-Украинской моноклинали и Скифской плиты. *Доповіді НАН України*, 7: 85–90.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В.Е., Сухорученко С.К., Клянчин А.И. 2020. Организация и первые результаты сейсмических наблюдений в северо-западной части территории Крыма. Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. *География. Геология*, 6(72), 4: 144–169.
- Захаров В.С., Симонов Д.А., Брянцева Г.В., Косяевич Н.И. 2019. Характеристики самоподобия системы водотоков Керченского полуострова и их сопоставление с результатами структурно-геоморфологического анализа. *Геофизические процессы и биосфера*, 18(1): 50–60. doi:10.21455/GPB2019.1-5
- Вольфман Ю.М., Пустовитенко Б.Г., Колесникова Е.Я. 2022. Новые результаты тектонофизического анализа фокальных механизмов землетрясений Крымско-Черноморского региона. Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. *География. Геология*, 8(74), 4: 163–206. EDN: TGQYVR
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. 1977. (Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин). М.: Наука, 536 с.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. 1989. Землетрясения Крымско-Черноморского региона (инструментальный период наблюдений 1927–1986 гг.). Киев: Наукова думка, 192 с.
- Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. 2007. Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*, 78(6): 579–590. doi:10.1785/gssrl.78.6.579
- Калинюк И.В., Свидлова В.А., Бондарь М.Н. 2019. Сейсмичность Крыма в 2018 году. Ученые записки Крымского Федерального университета им. В.И. Вернадского. *География. Геология*, 5(71), S4: 7–75.
- Tari E., Sahin M., Barka A., Reilinger R., King R., McClusky S., Prilepin M. 2000. Active tectonics of the Black Sea with GPS. *Earth Planets Space*, 52: 747–751. <https://doi.org/10.1186/bf03352276>
- Милюков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. 2015. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям. *Геотектоника*, 3: 56–65. doi:10.7868/S0016853X15030042
- Миронов А.П., Милюков В.К., Стеблов Г.М. 2016. Современные подвижки северного Кавказа и Крыма по GPS наблюдениям. В кн.: Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докл. Всерос. конф.*, т. 1, с. 168–170.
- Юбко В.М., Глазырин Е.А., Шестопалов В.Л. 2016. Опыт измерения современных движений земной коры в районе Азово-Черноморского побережья РФ. Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докл. Всерос. конф.*, т. 1, с. 298–303.
- Глазырин Е.А., Шестопалов В.Л. 2018. Современные движения поверхности Земли Российского сегмента побережья Черного моря по данным GPS-наблюдений. В кн.: *Система Черного моря* (ред. А.П. Лисицын). М.: Научный мир, гл. 1, разд. 1.3, с. 76–84.
- Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. 2019. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим. *Геоинформатика*, 2: 25–33.
- Молчанов А.Б., Гордеев Н.А. 2021. Автоматизация метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим с применением алгоритмов компьютерного зрения. *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, 18: 301–304. <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.056>
- Сим Л.А. 2000. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ

- Европы. В кн.: *М.В. Гзовский и развитие тектонофизики*. М.: Наука, с. 326–350.
23. Сим Л.А. **1991**. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам: Методы, результаты, рекомендации. *Изв. вузов. Геология и разведка*, 1(10): 3–22.
24. Гзовский М.В. **1975**. *Основы тектонофизики*. М.: Наука, 536 с.
25. Бондарь И.В., Гордеев Н.А. **2023**. Кинематика Имандра-Колвицкого разлома в районе озера Среднее Луwenьгское (Кольский полуостров). *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, 20: 497–503. doi:10.31241/FNS.2023.20.064
26. Юдин В.В. **2001**. *Геологическое строение Крыма на основе актуалистической геодинамики: Приложение к науч.-практ. дискуссионно-аналит. сб. «Вопросы развития Крыма»*. Симферополь, 46 с.
27. Пейве А.В., Беляевский Н.А., Суворов А.И., Унксов В.А. **1977**. *Разломы и горизонтальные движения сооружений СССР*. М.: Наука, 128 с.

References

1. *Geology of USSR*. (ed. M.V. Muratov). **1969**. Vol. 33. [*Crimea. Geological description*]. Moscow: Nedra, 576 p. (In Russ.).
2. Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. **2017**. The active faults of Eurasia database. *Geodynamics & Tectonophysics*, 8(4): 711–736. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>
3. Ovsyuchenko A.N., Vakarchuk R.N., Korzhenkov A.M., Larkov A.S., Sysolin A.I., Rogozhin E.A., Marahanov A.V. **2019**. Active faults of the Kerch's Peninsula: new results. *Doklady Earth Sciences*, 488(2): 1152–1156. doi:10.1134/S1028334X19100076
4. Wolfman Yu.M. **2021**. [Features of the processes of Alpine tectonic rupture and seismogenesis in the Crimean-Black Sea region]: Dissertation of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, 371 p. Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow. (In Russ.).
5. Kats Ya.G., Makarova N.V., Kozlov V.V., Trofimov D.M. **1981**. [Structural and morphological analysis of Crimea based on space imagery interpretation]. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka = Geology and Exploration*, 3: 8–20. (In Russ.).
6. Makarova N.V., Makeev V.M., Galitskaya I.V., Sukhanova T.V. **2018**. Neotectonics of Plain Crimea in connection with problems of water supply. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series*, 93(3): 3–11. (In Russ.).
7. Gordienko V.V., Gordienko I.V., Zavgorodnjaja O.V. **2015**. Recent activation and heat field of the South-Ukrainian monocline and the Scythian plate. *Доповіді НАН України*, 7: 85–90.
8. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Sukhoruchenko S.K., Klyanchin A.I. **2020**. [Organization and first results of seismic observations in the northwestern part of the Crimea territory]. *Uchenyye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 6(72), 4: 144–169. (In Russ.).
9. Zakharov V.S., Simonov D.A., Bryantseva G.V., Kosevich N.I. **2019**. Self-similarity properties of the Kerch Peninsula stream network and their comparison with the results of structural and geomorphological analysis. *Izv. Atmospheric and Oceanic Physics*, 55: 721–730. <https://doi.org/10.1134/s0001433819070120>
10. Wolfman Yu.M., Pustovitenko B.G., Kolesnikova E.Ya. **2022**. [New results of the tectonophysical analysis of the focal mechanisms of earthquakes in the Crimean-Black Sea region]. *Uchenyye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 8(74), 4: 163–206. (In Russ.).
11. *New catalogue of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975*. **1977**. (eds N.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin). Moscow: Nauka, 536 p. (In Russ.).
12. Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Goryachun A.V. **1989**. [Earthquakes of the Crimean-Black Sea region (instrumental observation period 1927–1986)]. Kyiv: Naukova Dumka, 192 p.
13. Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D. **2007**. Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales. *Seismological Research Letters*, 78(6): 579–590. doi:10.1785/gssrl.78.6.579
14. Kalinyuk I.V., Svidlova V.A., Bondar M.N. **2019**. Seismicity of the Crimea in 2018. *Uchenyye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 5(71), S4: 7–75. (In Russ.).
15. Tari E., Sahin M., Barka A., Reilinger R., King R., McClusky S., Prilepin M. **2000**. Active tectonics of the Black Sea with GPS. *Earth Planets Space*, 52: 747–751. <https://doi.org/10.1186/bf03352276>
16. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. **2015**. Velocities of contemporary movements of the Northern Caucasus estimated from GPS observations. *Geotectonics*, 49(3): 210–218. <https://doi.org/10.1134/s0016852115030036>
17. Mironov A.P., Milyukov V.K., Steblov G.M. **2016**. [Modern movements of the Northern Caucasus and Crimea based on GPS observations]. In: *Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и современные проблемы земной поверхности: материалы докладов*, 1: 168–170. (In Russ.).
18. Yubko V.M., Glazyrin E.A., Shestopalov V.L. **2016**. [Experience in measuring modern crustal movements in the Azov-Black Sea coast of the Russian Federation]. In: *Четвертая тектонофизическая конференция*

- v IFZ RAN. *Tectonophysics and current issues of Earth sciences: Materialy dokladov*, 1: 298–303. (In Russ.).
19. Glazyrin E.A., Shestopalov V.L. **2018**. Modern movements of the Earth's surface of the Russian segment of the Black Sea coast according to GPS observations. In: (Lisitsyn A.P., ed.) *The Black Sea system*. Moscow: Scientific World, Cpt. 1, pt. 1.3, p. 76–84. (In Russ.).
20. Gordeev N.A., Molchanov A.B. **2019**. Automation of L.A. Sim structural-geomorphological method for reconstruction of shear tectonic stresses. *Geoinformatika*, 2: 25–33. (In Russ.).
21. Molchanov A.B., Gordeev N.A. **2021**. Application of computer vision algorithms in tectonophysics. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*, 18: 301–304. (In Russ.). <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.056>
22. Sim L.A. **2000**. [The influence of global tectogenesis on the recent stress state of European platforms]. In: *M.V. Gzovskii and the progress in tectonophysics*. Moscow: Nauka, p. 326–350. (In Russ.).
23. Sim L.A. **1991**. Study of tectonic stresses using geological indicators: Methods, results, recommendations. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka = Geology and Exploration*, 1(10): 3–22. (In Russ.).
24. Gzovsky M.V. **1975**. *Fundamentals of tectonophysics*. Moscow: Nauka, 536 p. (In Russ.).
25. Bondar I.V., Gordeev N.A. **2023**. Kinematics of the Imandra-Kolvitsky fault in the area of Lake Srednee Luvengskoye (Kola Peninsula). *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*, 20: 497–503. (In Russ.). <https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.064>
26. Yudin V.V. **2001**. *Geological structure of Crimea based on actualistic geodynamics*: Appendix to the scientific-practical, discussion-analytical collection “Issues of the development of Crimea”. Simferopol’, 46 p. (In Russ.).
27. Peive A.V., Belyaevsky N.A., Suvorov A.I., Unkssov V.A. **1977**. *[Faults and horizontal movements of structures in the USSR]*. Moscow: Nauka, 128 p. (In Russ.).

Об авторах

Сим Лидия Андреевна (SPIN-код: 4686-7834), доктор геолого-минералогических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия, sim@ifz.ru

Гордеев Никита Александрович (<https://orcid.org/0000-0001-9440-5890>), кандидат геолого-минералогических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия, gord@ifz.ru

Сычева Найля Абдулловна (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), кандидат физико-математических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия, nelya@ifz.ru

Поступила 06.10.2025

Принята к публикации 15.11.2025

About the Authors

Sim, Lidiya A. (SPIN: 4686-7834), Doctor of Geology and Mineralogy, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, sim@ifz.ru

Gordeev, Nikita A. (<https://orcid.org/0000-0001-9440-5890>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, gord@ifz.ru

Sycheva, Nailya A. (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, nelya@ifz.ru

Received 6 October 2025

Accepted 15 November 2025