

Морфоструктура юго-восточной части полуострова Камчатка

©2025 А. В. Никитин[✉], А. И. Трегуб

*Воронежский государственный университет,
Университетская пл. 1, 394018 Воронеж, Российская федерация*

Аннотация

Введение: район исследований расположен в южной части Камчатского полуострова, к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский. Цель статьи – изучить морфоструктурные особенности территории и оценить их связь с перспективами обнаружения термальных вод в пределах изучаемой площади.

Методика исследования включала: морфометрический анализ крупномасштабных топографических карт, выделение линейных элементов морфоструктуры на основе структурного дешифрирования космических снимков, авторские маршрутные наблюдения с изучением новейших пликативных элементов и разрывных нарушений, которые могут отражаться в поле линеаментов, установление связи результатов дешифрирования с данными геологической съемки.

Результаты и обсуждение: составлены: карта морфоизогипс с разделением морфоструктурного и морфоскульптурного рельефа и карта энергии рельефа, отражающая распределение активных современных вертикальных тектонических движений. На основе дешифрирования космических снимков выделены линеаменты, среди которых обособлены локальные и региональные формы. Предложена модель их формирования. Намечены возможные связи термальных вод и морфоструктуры.

Заключение: с позиции морфоструктурных особенностей территории возможные выходы термальных вод могут быть связаны с зонами повышенной проницаемости пород на границах положительных и отрицательных морфоструктур, отражающих соотношение неотектонических блоков. Особое значение могут иметь региональные линеаменты дизъюнктивно-пликативного типа со сдвиговой кинематикой. В их пределах интерес представляют деструктивные поля с повышенной степенью трещиноватости, в контурах которых может происходить концентрация флюидных потоков с повышенной температурой.

Ключевые слова: р. Вилюча, Мутновская и Жировая, юго-восток Камчатки, морфоструктура, линеаменты и энергия рельефа, термальные воды.

Для цитирования: Никитин А. В., Трегуб А. И. Морфоструктура юго-восточной части полуострова Камчатка // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2025. № 3. С. 4–11. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/3/4-11>

Введение

Исследование морфоструктуры территории связано с поисками термальных вод для строительства энергетических объектов. Изученная территория расположена в пределах южной части Камчатского полуострова (рис.1).

Важнейшими задачами морфоструктурных исследова-

ний для данной территории является изучение новейших пликативных элементов и разрывных нарушений, которые могут отражаться в поле линеаментов. Задача вычленения разломных структур из всей линеаментной сети, выделяемой на основе структурного дешифрирования материалов дистанционного зондирования Земли, а также установление связи результатов



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Никитин Александр Васильевич, e-mail: nikav_1960@mail.ru



Рис.1. Схема расположения района исследований.
[Fig.1. The layout of the research area.]

дешифрирования с данными геологической съемки весьма актуальна.

Основными материалами при выполнении работы являлись космические снимки системы Landsat, геологическая карта территории, результаты авторских маршрутных исследований, детальная топографическая основа, а также опубликованные материалы.

Методика исследований

Методика исследований включала изучение пликативной части морфоструктуры по результатам морфометрического анализа крупномасштабных топографических карт, а также выделение линейных элементов морфоструктуры на основе структурного дешифрирования космических снимков.

Среди методов морфометрии были использованы методы составления карты морфоизогипс и анализа потенциальной энергии рельефа, которая является результатом преобразования кинетической энергии вертикальных тектонических движений. Карта морфоизогипс представляет результат генерализации топографической карты с разделением морфоструктурного и морфоскульптурного рельефа [1]. Для составления карты энергии рельефа [1] использовано скользящее окно площадью один квадратный километр. При исследовании морфоструктуры, кроме энергии рельефа, использована информация по геологическому строению территории [2]. С этой целью по материалам геологической съемки была составлена геологическая карта территории.

Структурное дешифрирование выполнено по космическим снимкам системы Landsat-8. При дешифрировании главным дешифровочным признаком был плановый рисунок гидросети, поскольку он отражает распределение приповерхностной трещиноватости [3]. Эта трещиноватость создает ослабленные зоны (зоны повышенной проницаемости пород), которые осваиваются

эрозионной сетью в процессе ее формирования. Таким образом, подобные формы полностью соответствуют наименованию – «морфоструктура», то есть, тектоническая структура (трещиноватость горных пород), выраженная в рельефе сочетанием речных долин.

Большое значение имеет вязкость горных пород. В приповерхностной части литосферы она составляет значительную величину – 10^{24} Па·с. Поэтому здесь развиваются хрупкие разрывы. По мере увеличения глубины нарастает литостатическое давление и температура. Вязкость пород постепенно понижается, и на уровне гранулит-базитового слоя (глубина около 15-20 км) при литостатическом давлении 3.5 Кбар и температуре 673К она составляет 10^{22} Па·с [4]. На смену хрупким деформациям приходят пластические. Таким образом, можно предположить, что региональным линейаментам на глубине соответствуют не только разломы, но и складчатые формы.

Результаты и обсуждение

Морфоструктура территории включает несколько составляющих [5]. Первая составляющая представлена литоморфным (структурно-денудационным) рельефом. В его основе – различия в устойчивости пород к процессам денудации. В этом рельефе выделяются бронирующие горизонты, характер залегания которых (горизонтальный, наклонный, складчатый) определяет тип литоморфного рельефа. В условиях изучаемого участка такими горизонтами являются лавовые покровы базальтового, андезитобазальтового состава (рис. 2). Вторая составляющая образована неотектоническим рельефом [6], а третья – линейаментами.

Краткая геологическая характеристика может быть представлена по анализу геологической карты (рис.2), а также по фондовым и опубликованным данным [2]. В целом в разрезе отмечаются ритмы различных порядков. В начале ритмов залегают вулканогенно-осадочные толщи, которые сменяются преимущественно пирокластическим материалом. Завершение ритма выражено эффузивными образованиями. Для описываемых отложений отмечаются большие мощности, измеряемые десятками и сотнями метров. В пределах характеризуемой территории наиболее древними породами, выходящими на поверхность под четвертичными элювиальными, аллювиальными отложениями, а также образованиями склонового ряда, являются породы олигоцена. Они представлены туфоалевролитами с прослоями и линзами туфопесчаников, туффитов, туфов общей мощностью 750–800 м. Эти породы распространены в центральной части территории и слагают блоки, ограниченные сбросами с амплитудой несколько сотен метров (см. рис.2).

Конец олигоцена – начало миоцена знаменует начало неотектонического этапа в развитии земной коры [7]. Олигоцен-миоценовые отложения представлены туфопесчаниками, туфоалевролитами, туфогравелитами, туффитами. Их суммарная мощность достигает 700 м. Площади их распространения сопостав-

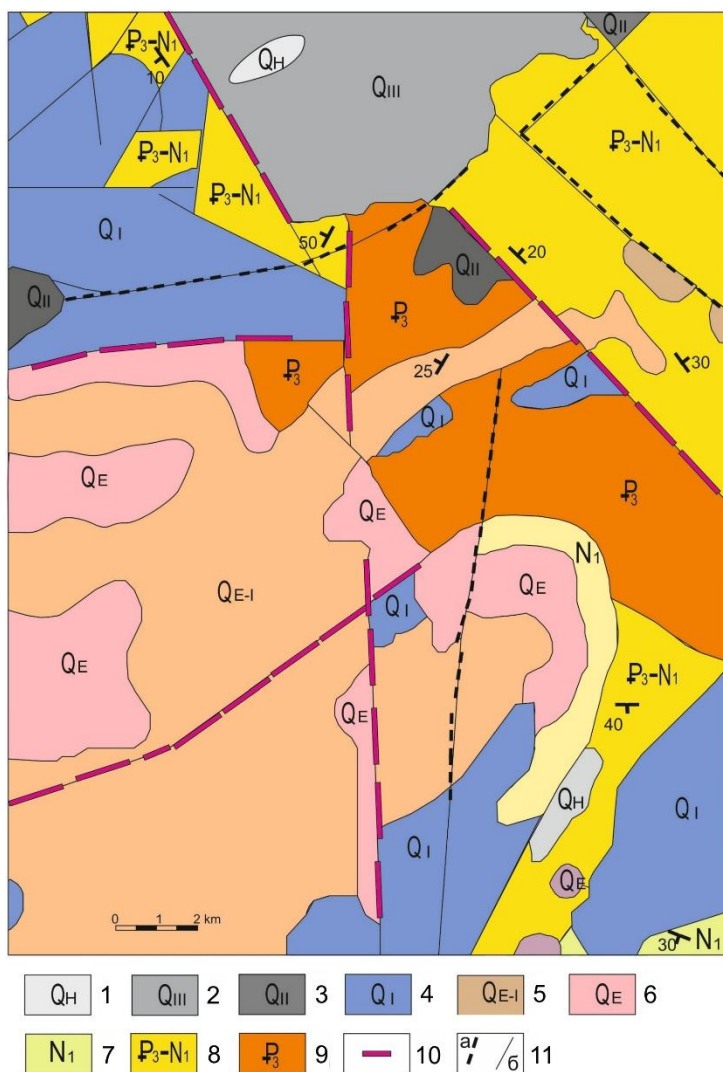


Рис. 2. Геологическая карта. Составлена на основе опубликованных материалов [2]: 1 – голоцен. Современные вулканогенные образования – базальты. 2 – верхний неоплейстоцен – андезиты. 3 – средний неоплейстоцен – игнимбриты. 4 – нижний неоплейстоцен – игнимбриты, туффиты, риолиты. 5 – эоплейстоцен-нижний плейстоцен – базальты, андезибазальты, андезиты, туфы. 6 – эоплейстоцен – андезиты, порфировые диориты. 7 – миоцен – туфопесчаники. 8 – верхний олигоцен-нижний миоцен – туфопесчаники, туфоалевролиты. 9 – олигоцен – туфоалевролиты, туффиты. 10 – разломы первого порядка. 11 – разломы второго (а) и более высоких порядков (б).

[Fig. 2. Geological map. Compiled on the basis of published materials [2]: (1) – Holocene. Modern volcanogenic formations are basalts. (2) – Upper Pleistocene – andesites. (3) – Middle Pleistocene – ignimbrites. (4) – Lower Pleistocene – ignimbrites, tuffites, rhyolites. (5) – Eopleistocene-Lower Pleistocene – basalts, andesibasalts, andesites, tuffs. (6) – Eopleistocene – andesites, porphyritic diorites. (7) – Miocene – tuff sandstones. (8) – Upper Oligocene-Lower Miocene – tuff sandstones, tufoaleurolites. (9) – Oligocene – tufoaleurolites, tuffites. (10) – faults of the first order. (11) – faults of the second (a) and higher orders (b).]

ляются в основном с восточной частью изучаемой территории (см. рис. 2). Выходы пород олигоцена-миоцена со всех сторон ограничены разломами. Сходным составом и мощностью 500–650 м обладают отложения миоцена. Однако в верхней части их разреза появляются субвулканические тела андезитов, диорит-порфиров, прослои базальтов, которые намечают конец ритма.

Наибольшую площадь распространения занимают четвертичные вулканогенные образования. Эоплейстоценовые и эоплейстоцен-неоплейстоценовые породы образуют отдельный ритм в разрезе. В его нижней части распространены игнимбриты, туффиты мощностью до 200 м. Они сопровождаются субвулканическими телами и дайками риолитов. В верхней части разреза, соответствующей нижнему неоплейстоцену, появляются низкокальциевые базальты, андезибазальты, андезиты с субвулканическими телами сложного состава. Их общая мощность достигает 800 м. Породы нижнего неоплейстоцена распространены преимущественно в северо-западной и юго-восточной частях территории.

Средний неоплейстоцен – игнимбриты дацитового

и андезитового составов мощностью до 300 м, распространены ограничено. Гораздо шире развит верхний неоплейстоцен, по-видимому, образующий со средним единый ритм и представленный толщей андезитов мощностью до 400 м.

Голоценовые породы распространены локально и приурочены к действующим вулканам. В ранней фазе они представлены плагиоипроксеновыми базальтами (до 400 м), которые в поздней фазе перекрыты потоками оливковых базальтов мощностью до 50 м.

Таким образом, бронирующими горизонтами, определяющими формирование литоморфного рельефа, являются толщи базальтов различного возраста, которые фиксируют финальную часть вулканического цикла (ритма). В стратиграфическом отношении они сопоставляются с миоценом, нижним, верхним неоплейстоценом и голоценом. Основными морфоструктурными формами в пределах территории являются бронирующие покровы и структурные террасы, расположенные на различных гипсометрических уровнях. Неотектоническая составляющая в морфоструктуре территории выражена в деформациях этих поверхностей.

На карте морфоизогипс выделяются несколько наиболее крупных морфоструктурных элементов (рис. 3). Среди отрицательных морфоструктур – это два прогиба, расположенных на севере и юге территории. К ним приурочены долины рек: Вилюча, Спокойный, Жировая и Мутновская. Положительные морфоструктуры образованы двумя блоками, выраженными плосковершинными возвышенностями. Плоские привершинные поверхности образуют верхний ярус в рельефе [8]. Они отвечают конденсационному этапу

в его развитии. Поверхности осложнены остаточными формами – изометричными денудационными останцами. Гипсометрическое положение южной возвышенности выше северной примерно на 200–250 м. Эта величина, по-видимому, характеризует высотное положение блоков в новейшей структуре.

Карта энергии рельефа отражает распределение активных современных вертикальных тектонических движений (рис. 4). Наиболее активные из них сосредоточены в юго-западной части территории.

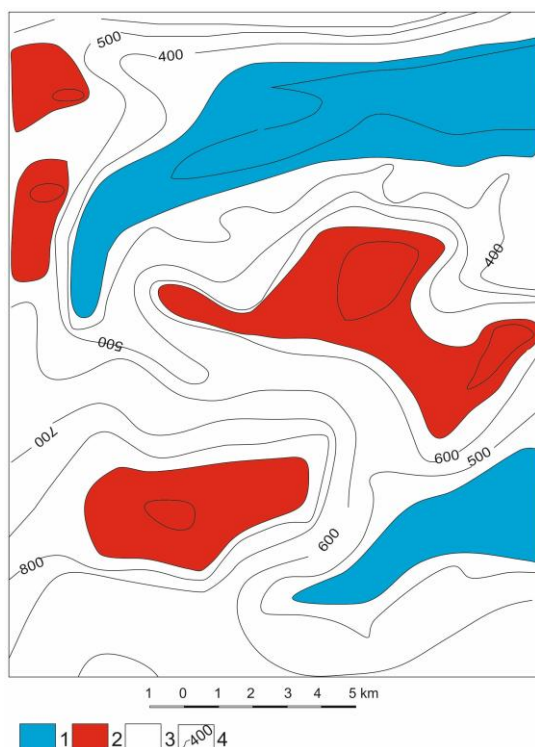


Рис. 3. Карта морфоизогипс: 1 – области преимущественной аккумуляции; 2 – структурные террасы и покровы верхнего яруса; 3 – эрозионные формы нижнего яруса рельефа; 4 – морфоизогипсы.

[Fig. 3. Map of morphoisohypses: (1) – areas of predominant accumulation; (2) – structural terraces and covers of the upper tier; (3) – erosive forms of the lower tier of relief; (4) – morphoisohypses.]

В качестве важнейших морфоструктурных элементов выступают линеаменты, статистически отражающие приповерхностную трещиноватость горных пород. Их выделение проведено в результате структурного дешифрирования космических снимков (рис. 5). Линеаменты разделены на два класса: первый из них – локальные линеаменты, отличающиеся небольшой длиной и прямой связью с эрозионной сетью. Они связаны с приповерхностной трещиноватостью.

Такая трещиноватость может иметь различную природу. В условиях изучаемой территории широко распространены контракционные трещины в магма-

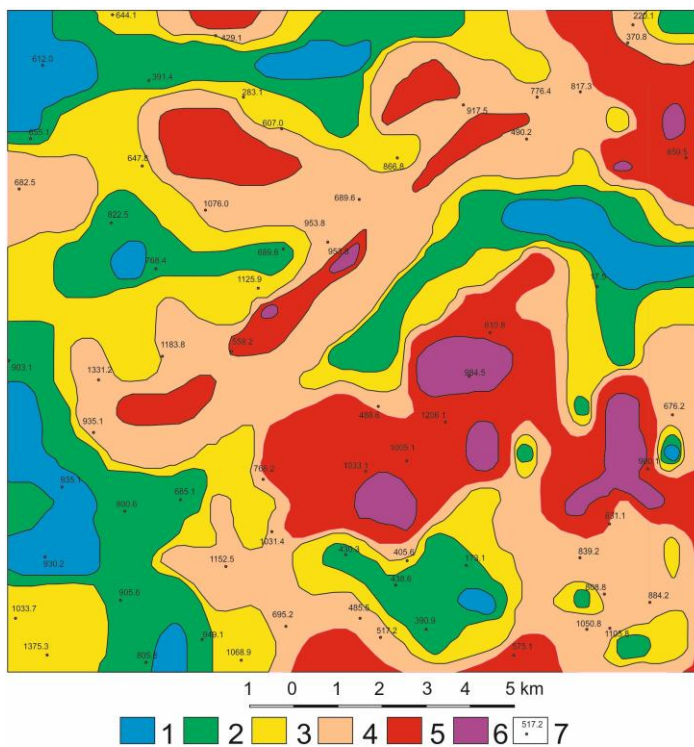


Рис. 4. Карта энергии рельефа. Потенциальная энергия рельефа (м/км²): 1 – менее 25; 2 – от 26 до 45; 3 – от 46 до 65; 4 – от 66 до 85; 5 – от 86 до 105; 6 – более 106. 7 – абсолютные высоты.

[Fig. 4. Map of the energy of relief. Potential energy of the relief (m/km²): (1) – less than 25; (2) – from 26 to 45; (3) – from 46 to 65; (4) – from 66 to 85; (5) – from 86 to 105; (6) – more than 106. (7) – absolute heights.]

тических породах (базальтах, андезитах), образующие столбчатую отдельность (рис. 6). Трещины контракции дополняются диагенетическими трещинами в осадочных и вулканогенно-осадочных образованиях, к ним добавляются тектонические трещины. Все они вместе образуют общую трещиноватость горных пород [9]. Результаты массовых замеров ориентировки трещин в обнажении в долине р. Жировая (рис. 7) позволяют выделить несколько отчетливо выраженных направлений. Такая трещиноватость, определяя развитие эрозионных форм, составляет основу, по которой дешифрируются локальные линеаменты (рис. 8).

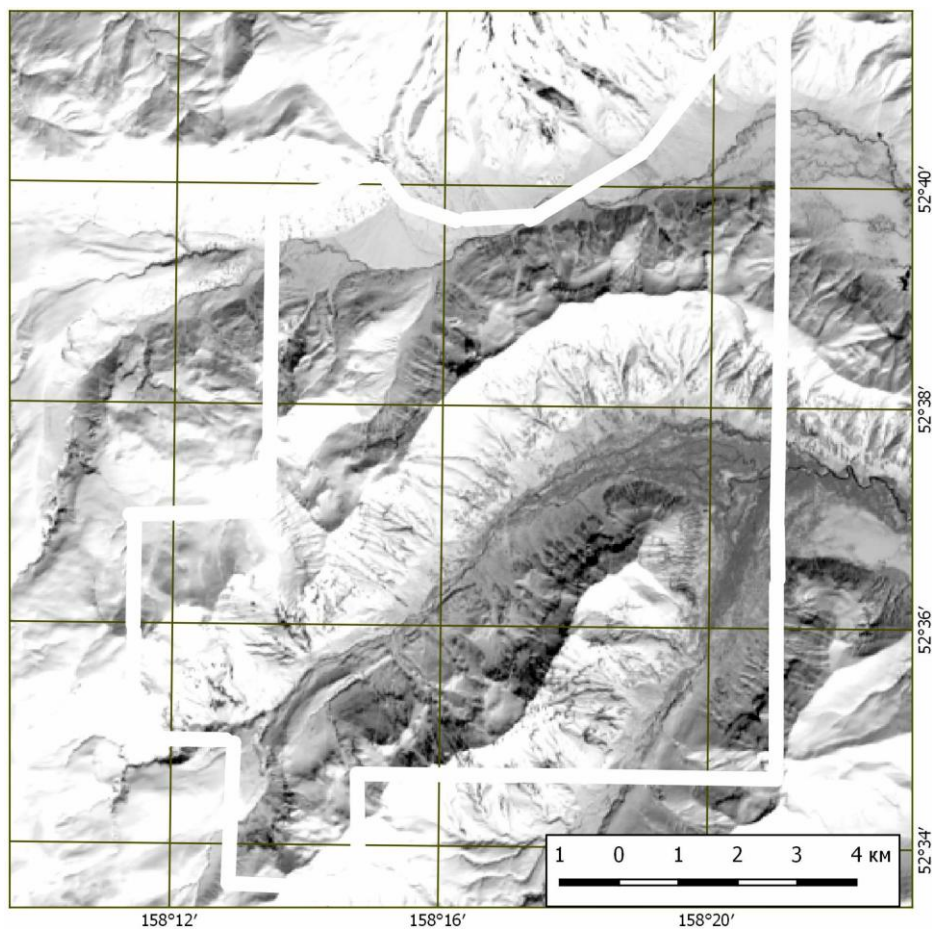


Рис. 5. Космические снимки территории (Landsat /Copernicus. Map Data 2023).
[Fig. 5. Satellite images of the territory (Landsat /Copernicus. Map Data 2023).]



Рис. 6. Столбчатая отдельность в базальтах (долина р. Мутновская).
[Fig. 6. Columnar separation in basalts (valley of the Mutnovskaya river).]

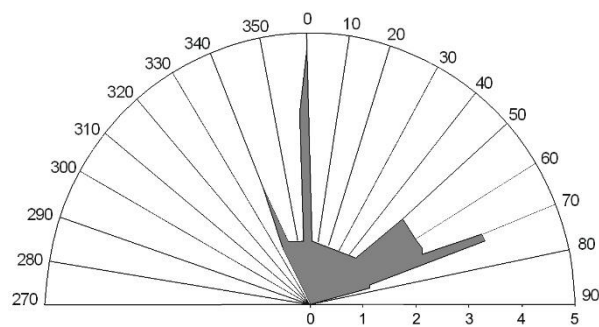


Рис.7. Результаты статистической обработки замеров простираний трещин в долине р. Жировая.
[Fig.7. The results of statistical processing of measurements of crack extensions in the valley of the Zhirovaya River.]

Региональные линеаменты могут быть выделены как протяженные зоны сгущения локальных линеаментов (рис.9). Они фиксируют зоны повышенной проницаемости горных пород и могут отвечать областям эндогенной активизации [10]. Ширина таких зон и их интраструктура соответствуют стадиям развития областей динамического влияния зарождающихся разломов [11].

Среди региональных линеаментов на севере и юге территории преобладают линеаменты шириной около одного километра.

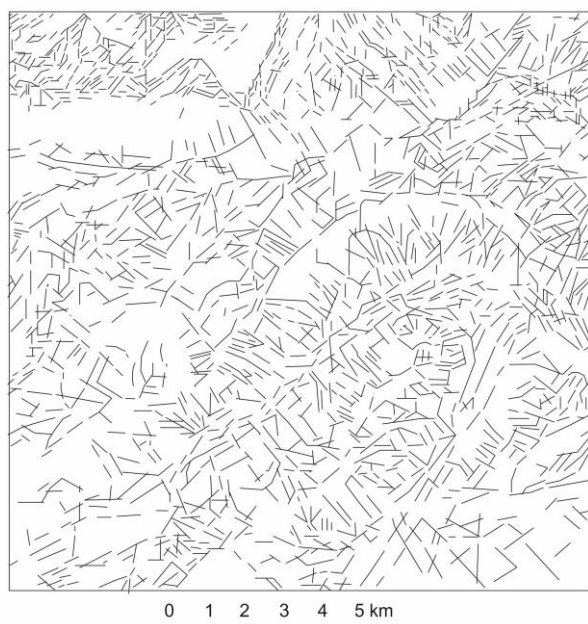


Рис. 8. Локальные линейменты по результатам структурного дешифрирования космических снимков.
[Fig. 8. The local lineaments based on the results of interpretation of space images.]

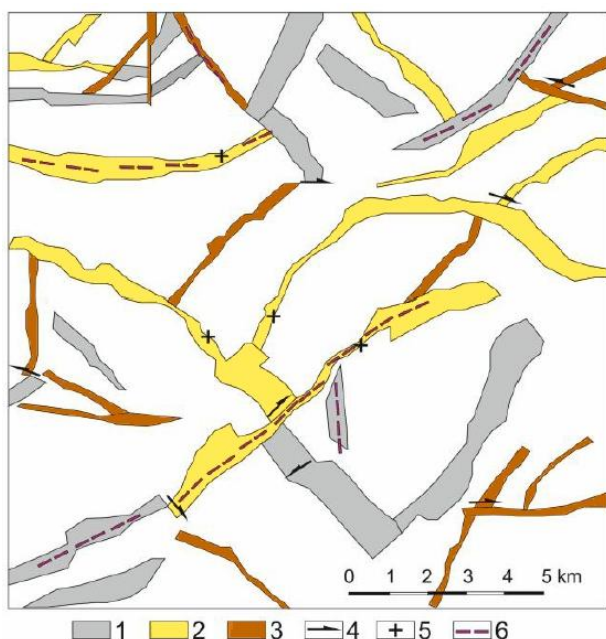


Рис. 9. Региональные линейменты по результатам структурного дешифрирования космических снимков. Стадии развития областей динамического влияния формирующихся разломов: 1 – пликативная, 2 – дизъюнктивно-пликативная, 3 – дизъюнктивная. Предполагаемые кинематические условия формирующихся областей динамического влияния: 4 – сдвиговые, 5 – сбросовые и взбросовые. 6 – фрагменты разломов по данным геологической съемки (см. рис. 2).

[Fig. 9. Regional lineaments based on the results of structural decoding of satellite images. The stages of development of the areas of dynamic influence of the emerging faults are: (1) – plicative, (2) – disjunctive-plicative, (3) – disjunctive. The assumed kinematic conditions of the emerging areas of dynamic influence are: (4) – shear, (5) – discharge and uplift. (6) – fragments of faults according to

geological survey data (see Fig. 2).]

Они отражают пликативную стадию развития области динамического влияния зарождающегося разлома [11]. Линейменты с инфраструктурой переходного (дизъюнктивно-пликативного) типа обладают изменчивой шириной, в среднем около 300-500 м. Они составляют большинство региональных линейментов. Наиболее узкими зонами обладают линейменты с дизъюнктивной стадией развития.

В кинематическом отношении среди региональных линейментов выделяются структуры со сдвиговой кинематикой, а также с вертикальным смещением крыльев (сбросы и взбросы).

Заключение

Возможные выходы термальных вод с позиции морфоструктурных особенностей территории могут быть связаны с зонами повышенной проницаемости пород. Такие зоны расположены на границах положительных и отрицательных морфоструктур, отражающих соотношение неотектонических блоков. Особое значение могут иметь региональные линейменты дизъюнктивно-пликативного типа со сдвиговой кинематикой. В их пределах интерес представляют деструктивные поля с повышенной степенью трещиноватости. В контурах этих полей может происходить концентрация флюидных потоков с повышенной температурой.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонов А. И. Геоморфологическое картографирование. М.: Недра, 1985. 183 с.
2. Шеймович В. С., Рундквист И. К., Сидоров М. Д. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Серия Южно-Камчатская. Листы N-57-XXI (Северные Корьяки), N-57-XXVII (Петропавловск-Камчатский), N-57-XXXIII (сопка Мутновская). Объяснительная записка. М., 2000. 302 с.
3. Трегуб А. И., Шевченко К. М. Приповерхностная трещиноватость и развитие экзогенных процессов на юге Воронежской области. *Новые идеи в науках о Земле: материалы Международной научно-практической конференции.* М.: МГРИ, 2021. С. 123–126.
4. Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А. Глубинная геодинамика. 2 изд. доп. и перераб. Новосибирск: ГЕО, 2001. 409 с.
5. Герасимов И. П. Рельеф Земли (морфоструктура и морфоскульптура). М.: Наука, 1967. 330 с.
6. Николаев Н. И. Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР. (Вопросы региональной и теоретической неотектоники). М.: Госгеолтехиздат, 1962. 392 с.
7. Флоренсов Н. А. Рельеф и неотектоника. М.: Наука, 1989. 272 с.
8. Костенко Н. П. Развитие рельефа горных стран (на примере Средней Азии). М.: Мысль, 1970. 367 с.
9. Белоусов В. В. Основы геотектоники. М.: Недра, 1975. 264 с.
10. Юдахин Ф. Н., Шукин Ю. К., Макаров В. И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 299 с.
11. Шерман С. И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск, 1977. 102 с.

Morphostructure of the southeastern part of the Kamchatka Peninsula

©2025 A. V. Nikitin✉, A. I. Tregub

*Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl.,
394018, Voronezh, Russian Federation*

Abstract

Introduction: the study area is located in the southern part of the Kamchatka Peninsula, southwest of Petropavlovsk-Kamchatsky. The purpose of the article is to study the morphostructural features of the territory and assess their relationship with the prospects for discovering thermal waters within the study area.

The research methodology included: morphometric analysis of large-scale topographic maps, identification of linear elements of the morphostructure based on structural interpretation of space images, author's route observations with the study of the latest tectonic elements and faults that can be reflected in the lineament field, establishing a connection between the interpretation results and geological survey data.

Results and discussion: the following have been compiled: a morphoisohypse map with division of morphostructural and morphosculptural relief and a relief energy map reflecting the distribution of active modern vertical tectonic movements. Based on the interpretation of space images, lineaments have been identified, among which local and regional forms have been isolated. A model of their formation has been proposed. Possible connections between thermal waters and morphostructure have been outlined.

Conclusion: from the position of morphostructural features of the territory, possible thermal water outlets can be associated with zones of increased rock permeability at the boundaries of positive and negative morphostructures, reflecting the relationship of neotectonic blocks. Regional lineaments of the disjunctive-plicative type with shear kinematics can be of particular importance. Within their limits, destructive fields with an increased degree of fracturing are of interest, in the contours of which concentration of fluid flows with elevated temperature can occur.

Keywords: Vilyucha, Mutnovskaya and Zhirovaya rivers, southeastern Kamchatka, morphostructure, lineaments and energy of relief, thermal waters.

For citation: Nikitin A. V., Tregub A. I. Morphostructure of the southeastern part of the Kamchatka Peninsula // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2025, no. 3, pp. 4–11. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/3/4-11>

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Alexander V. Nikitin, e-mail: nikav_1960@mail.ru

REFERENCES

1. Spiridonov A. I. *Geomorfologicheskoe kartografirovanie* [Geomorphological mapping]. Moscow, Nedra publ., 1985, 183 p. (In Russ.)
2. Shejmovich V. S., Rundkvist I. K., Sidorov M. D. *Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1: 200 000. Serija Juzhno-Kamchatskaja. Listy N-57-XXI (Severnye Koryaki), N-57-XXVII (Petropavlovsk-Kamchatskaj), N-57-XXXIII (sopka Mutnovskaja). Objasnitel'naja zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 200,000. South Kamchatka series. Sheets N-57-XXI (Northern Koryaki), N-57-XXVII (Petropavlovsk-Kamchatsky), N-57-XXXIII (Mutnovskaya hill). Explanatory note]. Moscow publ., 2000, 302 p. (In Russ.)
3. Tregub A. I., Shevchenko K. M. Pripoverhnostnaja treshhinovatost' i razvitie jekzogennyh processov na juge Voronezhskoj oblasti [Near-surface fracturing and the development of exogenous processes in the south of the Voronezh region]. *Novye idei v naukah o Zemle: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [New ideas in earth sciences: materials of the conference]. Moscow, MGRI publ., 2021, pp. 123–126 (In Russ.)
4. Dobrecov N. L., Kirdjashkin A. G., Kirdjashkin A. A. *Glubinaja geodinamika. 2 izd. dop. i pererab* [Deep geodynamics. 2nd ed. add. and revised]. Novosibirsk, GEO publ., 2001, 409 p. (In Russ.)
5. Gerasimov I. P. *Rel'ef Zemli (morfostruktura i morfoskulptura)* [Relief of the Earth (morphostructure and morphosculpture)]. Moscow, Nedra publ., 1967, 330 p. (In Russ.)
6. Nikolaev N. I. *Neotektonika i ee vyrazhenie v strukture i rel'efe territorii SSSR. (Voprosy regional'noj i teoreticheskoy neotektoniki)* [Neotectonics and its expression in the structure and relief of the territory of the USSR. (Issues of regional and theoretical neotectonics)]. Moscow, Gosgeoltekhizdat publ., 1962, 392 p. (In Russ.)
7. Florensov N. A. *Rel'ef i neotektonika* [Relief and neotectonics]. Moscow, Nedra publ., 1989, 272 p. (In Russ.)
8. Kostenko N. P. *Razvitie rel'efa gornyh stran (na primere Srednej Azii)* [Development of the relief of mountain countries (on the example of Central Asia)]. Moscow, Mysl publ., 1970, 367 p. (In Russ.)
9. Belousov V. V. *Osnovy geotektoniki* [Fundamentals of geotectonics]. Moscow, Nedra publ., 1975, 264 p. (In Russ.)
10. Judahin F. N., Shhukin Ju. K., Makarov V. I. *Glubinnoe stroenie i sovremennye geodinamicheskie processy v litosfere Vostochno-Evropejskoj platform* [Deep structure and modern geodynamic processes in the lithosphere of the East European platform]. Ekaterinburg, UrO RAN publ., 2003, 299 p. (In Russ.)
11. Sherman S. I. *Fizicheskie zakonomernosti razvitiya razlomov zemnoj kory* [Physical patterns of crustal fault development]. Novosibirsk publ., 1977, 102 p. (In Russ.)

Александр Васильевич Никитин, к.г.-м.н, доцент, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская федерация; e-mail: nikav_1960@mail.ru;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2808-7887>

Александр Иванович Трегуб, д.г.-м.н, профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская федерация; e-mail: tregub@yandex.ru;
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8653-1165>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Alexander V. Nikitin, PhD in Geol.-Min., Associate Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation;
e-mail: nikav_1960@mail.ru;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2808-7887>

Alexandr I. Tregub, Dr. habil. In Geol.-Min., Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation;
e-mail: tregubai@yandex.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8653-1165>

All authors have read and approved the final manuscript.