

УДК 551.1/.4

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-32-41

ВЗАИМОСВЯЗЬ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА И СЕЙСМИЧНОСТИ ОСТРОВА САХАЛИН

Алексей Леонидович Собисевич¹, Григорий Михайлович Стеблов²,
 Алексей Олегович Агибалов³✉, Алексей Андреевич Сенцов⁴,
 Георгий Романович Балашов⁵, Владимир Александрович Зайцев⁶,
 Дмитрий Сергеевич Зыков⁷, Владимир Михайлович Макеев⁸,
 Андрей Тимофеевич Маякин⁹, Виктор Петрович Передерин¹⁰,
 Федор Викторович Передерин¹¹, Антон Владимирович Полещук¹²,
 Александр Иванович Рузайкин¹³, Кирилл Игоревич Холодков¹⁴

¹ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; alex@ifz.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4656-6694>

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН; Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; steblov@ifz.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9157-8099>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; agibalo@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6742-3524>

⁴ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; alekssencov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6182-114X>

⁵ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; george.balashow.00@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4474-4899>

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; v.zaitsev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5460-6724>

⁷ Геологический институт РАН, Москва, Россия; zykov58@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6174-8920>

⁸ Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия; vmakeev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3393-6721>

⁹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mappsy91man@gmail.com

¹⁰ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; vpp@ifz.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4626-8662>

¹¹ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; crash@ifz.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7670-3851>

¹² Геологический институт РАН, Москва, Россия; anton302@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7276-6107>

¹³ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; a.ruzaykin@yandex.ru

¹⁴ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; keir@ifz.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0324-9795>

Аннотация. Проведенные нами структурно-геоморфологические и морфометрические исследования показали, что сейсмоактивные области о-ва Сахалин выделяются по положительным аномалиям 9-ти морфометрических параметров рельефа, где их значения превышают медиану. К этим параметрам относятся: разность гипсометрической поверхности и базисной поверхности 3-го порядка; разности базисных поверхностей 1-го и 2-го порядков, 2-го и 3-го порядков; глубина вертикального расчленения; стандартное отклонение экспозиции склонов; плотность «слабых» зон; асимметрия высот; стандартное отклонение гауссовой кривизны рельефа, взятое по модулю, и стандартное отклонение высот. Показано, что сейсмоактивные области могут быть оконтурены также по значениям семи параметров (исключая последние два из упомянутых), превышающим 3-ий quartиль. При этом наиболее информативна плотность «слабых» зон: в небольшие по размерам области (25% площади острова), где плотность «слабых» зон $\geq 36 \text{ км}^{-1}$, попадают 45% эпицентров всех землетрясений и 71% эпицентров землетрясений с магнитудой по поверхностным волнам $\geq 5,5$. Таким образом, на примере хорошо изученной в сейсмотектоническом отношении территории показаны возможности выделения сейсмоактивных участков по комплексу геоморфологических характеристик. Этот результат может быть востребован при оценке сейсмической опасности районов со среднегорным рельефом, где ранее не проводились сейсмологические исследования в детальном масштабе.

Ключевые слова: Сахалин, сейсмичность, морфометрический анализ рельефа

Для цитирования: Собисевич А.Л., Стеблов Г.М., Агибалов А.О., Сенцов А.А., Балашов Г.Р., Зайцев В.А., Зыков Д.С., Макеев В.М., Маякин А.Т., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Полещук А.В., Рузайкин А.И., Холодков К.И. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа и сейсмичности острова Сахалин // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 32–41.

INTERRELATION OF MORPHOMETRIC PARAMETERS OF RELIEF AND SEISMICITY OF SAKHALIN ISLAND

Aleksey L. Sobisevich¹, Grigory M. Steblov², Aleksey O. Agibalov^{3✉},
 Aleksey A. Sentsov⁴, Georgij R. Balashov⁵, Vladimir A. Zaitsev⁶, Dmitry S. Zykov⁷,
 Vladimir M. Makeev⁸, Andrey T. Mayakin⁹, Viktor P. Perederin¹⁰, Fedor V. Perederin¹¹,
 Anton V. Poleshchuk¹², Aleksander I. Ruzaykin¹³, Kirill I. Kholodkov¹⁴

¹ Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; alex@ifz.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4656-6694>

² Institute of the Theory of Earthquake Prediction and Mathematical Geophysics RAS; Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; steblov@ifz.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9157-8099>

³ Lomonosov Moscow State University; Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; agibalo@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6742-3524>

⁴ Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; alekssencov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6182-114X>

⁵ Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; george.balashov.00@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4474-4899>

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; v.zaitsev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5460-6724>

⁷ Geological Institute RAS, Moscow, Russia; zykov58@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6174-8920>

⁸ Sergeev Geoecology Institute RAS, Moscow, Russia; vmakeev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3393-6721>

⁹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mappsy91man@gmail.com

¹⁰ Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; vpp@ifz.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4626-8662>

¹¹ Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; crash@ifz.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7670-3851>

¹² Geological Institute RAS, Moscow, Russia; anton302@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7276-6107>

¹³ Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; a.ruzaykin@yandex.ru

¹⁴ Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; keir@ifz.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0324-9795>

Abstract. Our structural-geomorphological and morphometric studies have shown that seismically active areas of Sakhalin Island are distinguished by positive anomalies of 9 morphometric parameters of the relief, where their values exceed the median. These parameters include the difference between the hypsometric surface and the 3rd order base surface; differences between the 1st and 2nd orders, 2nd and 3rd orders base surfaces; depth of vertical dissection; standard deviation of slope exposure; density of “weak” zones; height asymmetry, standard deviation of the Gaussian curvature of the relief, taken by the module and standard deviation of heights. It is shown that seismically active areas can also be contoured by the values of the 7 mentioned parameters (excluding the last two mentioned), exceeding the 3rd quartile. The density of “weak” zones is the most informative: 45% of all earthquake epicenters and 71% of earthquake epicenters with a surface waves magnitude of ≥ 5.5 fall into small areas (25% of the island's area) where the density of “weak” zones is $\geq 36 \text{ km}^{-1}$. Thus, the example of a well-studied seismotectonic territory shows the possibilities of identifying seismically active areas based on a set of geomorphological characteristics. This result may be in demand when assessing the seismic hazard of areas with mid-mountain relief, where detailed seismological studies have not been conducted previously.

Keywords: Sakhalin, seismicity, morphometric relief analysis

For citation: Sobisevich A.L., Steblov G.M., Agibalov A.O., Sentsov A.A., Balashov G.R., Zaitsev V.A., Zykov D.S., Makeev V.M., Mayakin A.T., Perederin V.P., Perederin F.V., Poleshchuk A.V., Ruzaykin A.I., Kholodkov K.I. Interrelation of morphometric parameters of relief and seismicity of Sakhalin Island. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 6: 32–41. (In Russ.).

Введение. Остров Сахалин хорошо изучен в сейсмотектоническом отношении: здесь с 1924 по 2023 гг. было зафиксировано >300 эпицентров землетрясений с максимальной магнитудой по поверхности волнам $M_s = 7,5$ [International..., 2023; United..., 2023; Сейсмологический..., 2023], проведено детальное сейсмическое районирование [Сапрыгин, 2008], разработано несколько линеаментно-доменных моделей [Левин и др., 2012], оценена сейсмическая опасность территорий ответственных сооружений [Уломов, 2003], выделены активные разломы [Воейкова и др., 2007; Zelenin, et al., 2022]. В нашей работе данные об их конфигурации и расположении эпицентров современных землетрясений сопоставлены с результатами комплексного морфометрического анализа рельефа, для того чтобы на примере о-ва Сахалин показать возможности геоморфологических методов для выделения сейсмоактивных участков. Эта задача актуальна и интересна

из-за недостаточной изученности сейсмичности значительной части территории нашей страны по результатам инструментального сейсмологического мониторинга.

Геолого-геоморфологическое строение острова Сахалин. Остров Сахалин расположен в зоне взаимодействия трех литосферных плит: Курильской, Амурской и Охотской (рис. 1). Граница между двумя последними проходит по Тымь-Поронайскому (Центрально-Сахалинскому) глубинному разлому взбросо-надвигового типа. Однозначного решения о положении границ плит пока нет в связи с разноречивостью геолого-геофизических данных [Рогожин, 1996; Сим и др., 2017; Воейкова и др., 2007].

В альпийской структуре Сахалина выделяют Западную и Восточную зоны, разделенные Центрально-Сахалинским грабеном, выполненным кайнозойскими отложениями. Западная зона представляет собой моноклиналь, в строении которой участвуют

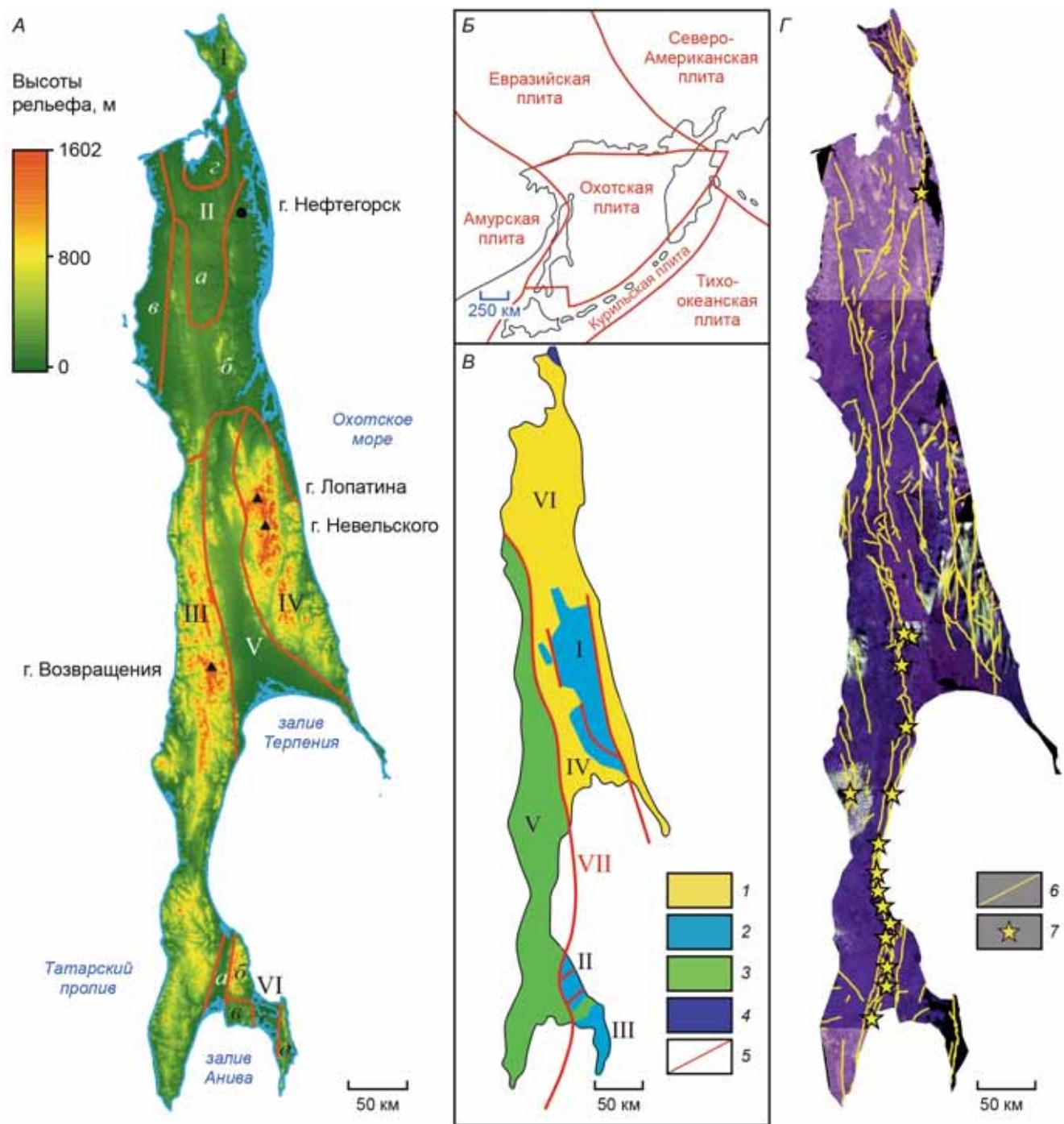


Рис. 1. Геолого-геоморфологические схемы о-ва Сахалин. А — схема геоморфологического районирования по [Ресурсы..., 1973]: I — п-ов Шмидта с равнинно-грядовым рельефом и прибрежным низкогорьем; II — Северо-Сахалинская равнина: а — аккумулятивно-денудационная равнина, б — денудационное плато с отдельными останцами и грядами, в — аккумулятивно-морская террасированная низменность, г — аккумулятивно-морская низменность с лагунами и косами; III — Западно-Сахалинские сильно расчлененные горы; IV — Восточно-Сахалинские глыбовые сильно расчлененные горы (с четко выраженным сбросовыми уступами); V — Тымь-Поронайская низменность, сложенная аллювиально-морскими отложениями; VI — Юго-Восточный Сахалин со сложным рельефом: а — Сусунайская депрессия, сложенная морскими и аллювиальными отложениями, б — Сусунайский складчато-горстовый хребет, в — Корсаковское абразионно-денудационное плато, г — Муравьёвская аккумулятивная низменность, д — Анивское складчато-глыбовое низкогорье. Б — границы литосферных плит Охотоморского региона, по [Злобин, 2006; Сим и др., 2017]. В — схема тектонического районирования о-ва Сахалин, по [Короновский, 2011]: 1 — неоген-четвертичные отложения, 2 — меловые и кайнозойские терригенные отложения, 3 — кремнисто-терригенно-вулканогенные отложения триаса — верхнего мела, 4 — олиголитовые покровы м. Шмидта, 5 — разрывные нарушения; римскими цифрами обозначены основные структуры: I — Восточная зона, II — поднятие Сусунайского хребта, III — поднятие Тонино-Анивского полуострова, IV — Центрально-Сахалинский грабен, V — Западная зона, VI — Северо-Сахалинский прогиб, VII — Тымь-Поронайский (Центрально-Сахалинский) разлом. Г — схема активных разломов, по [Zelenin, et al., 2022]: 6 — активные разломы, 7 — палеосейсмодислокации (по [Булгаков и др., 2002; Лободенко, 2010]); в качестве фона использованы космические снимки Landsat 8–9, выполненные в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне (комбинация каналов 6–7–5)

преимущественно терригенно-кремнистые отложения мелового и неогенового возраста. Восточная зона сложена породами офиолитовой ассоциации, вулканогенно-кремнистыми и терригенными образованиями триасового — мелового времени, метаморфизованными в условиях зеленосланцевой и глаукофановой фаций [Короновский, 2011].

В аспекте новейшей тектоники, относимой к второй половине альпийского тектономагматического цикла, структуры Сахалина тесно связаны с островным сооружением Хоккайдо. Два острова принадлежат единой Хоккайдо-Сахалинской системе островодужных поднятий. За начало новейшего этапа принимается время накопления отложений тортонаского яруса миоцена (11 млн лет). Согласно особенностям строения морских и субконтинентальных отложений, новейший этап разделен на ранне- и позднеорогенную стадии, граница которых соответствует несогласию в основании верхней подсвиты маруямской свиты (N_2 -Q). С несогласия начинается сахалинская фаза складчатости и этап сводообразных воздыманий, продолжающихся поныне. Структуры этой фазы выражены в деформациях предорогенной эрозионно-денудационной поверхности выравнивания (N_{1-2}) [Воейкова и др., 2007]. С позднеорогенной стадией связано формирование основных черт современного рельефа и сейсмическая активность в регионе [Мельников, 1987, 2010].

К основным формам рельефа Сахалина относятся меридионально вытянутые Западно- и Восточно-Сахалинские грядово-горные системы, разделенные Тымь-Поронайской низменностью. К северу от нее находятся Северо-Сахалинская равнина и полуостров Шмидта.

Главный водораздел между бассейнами рек Охотского моря и Татарского пролива образуют Западно-Сахалинские горы, достигающие высоты 1325 м (г. Возвращения), а самые высокие вершины острова — г. Лопатина (1609 м) и г. Невельского (1397 м) — расположены в центральной части Восточно-Сахалинских гор [Мельников, 2010; Ресурсы..., 1973].

Западно- и Восточно-Сахалинские горы являются сильно расчлененными глыбовыми (сводовыми) поднятиями. В них отчетливо выражены поверхности выравнивания со сбросовыми уступами, что позволяет рассматривать их в качестве горстов. Поднятия разновозрастны и асимметричны. Западно-Сахалинское поднятие образовалось на месте неогенового прогиба, отложения которого в конце плиоцена испытали складчатость, а в четвертичное время воздымание. Более древнее Восточно-Сахалинское поднятие начало формироваться до начала новейшего этапа и к настоящему времени оказалось сильно дифференцированным на локальные структуры.

Тымь-Поронайская низменность выполнена кайнозойскими аллювиально-морскими отложениями большой мощности. Характер нарушенности отложений указывает на формирование здесь гра-

бена или грабенообразного прогиба. В частности, на сопряжении его с Восточно-Сахалинским поднятием установлены кулисные нарушения сбросового типа [Рогожин, 1996]. Центрально-Сахалинский кайнозойский грабен приурочен к глубинному Тымь-Поронайскому взбросо-надвигому разлому, выраженному в структурах докайнозойского основания.

Северо-Сахалинская холмистая равнина (абс. отм. 200–400 м) выполнена морскими миоценовыми и континентальными плиоценовыми отложениями. На раннеорогенной стадии в миоцене и в начале плиоцена она находилась в пределах глубокого прогиба, который в конце плиоцена закрылся с образованием складчатости и разрывов. В позднеорогенную стадию в четвертичное время в его пределах формируется инверсионное поднятие, дифференцированное на увалы-поднятия, сопряженные с относительно узкими прогибами. Эти структуры в основном не согласуются со складчатыми структурами миоцена-плиоцена, но часть разрывов оказываются активизированными и орографически выражеными. Разрывы имеют кулисообразное строение и сопровождаются оперением. Это важно отметить, поскольку в пределах равнины расположен эпицентр Нефегорского катастрофического землетрясения 1995 г., во время которого возникло множество сейсмотектонических дислокаций [Рогожин, 1996].

Поднятие Шмидта является сводообразным. Прогиб, рассматриваемый как осевое понижение свода, сложен новейшими отложениями мощностью около 1 км. В основном это аналог маруямской свиты Южного Сахалина. По границам прогиба с поднятиями отмечаются флексурные изгибы.

На территории юго-восточного Сахалина с запада на восток выделяются Сусунайская депрессия, Сусунайский хребет, Корсаковское плато, Муравьевская низменность и Анивское низкогорье.

Сусунайская субмеридиональная депрессия, сложенная морскими и аллювиальными отложениями, раскрывается на юг в сторону залива Анива. На сопряжении депрессии с Западно-Сахалинским поднятием выделяется структурная ступень, формирующаяся в зоне пологого надвига. В рельефе он выражен кулисами. Сусунайский хребет является горстообразным, нарушенным с запада и востока сбросами. В рельефе они выражены ступенями отседания. Корсаковское плато — абразионно-денудационное. В нем выделяется пологое поднятие, переходящее к западу в ступень, которая формируется в пределах сбросовых нарушений. Муравьевская низменность с большими озерами рассматривается как аккумулятивная, формирующаяся в условиях грабенообразного прогиба. Анивское низкогорье является складчато-глыбовым.

Таким образом, сопоставление схем геоморфологического (рис. 1, А) и тектонического районирования (рис. 1, Б) показывает, что основные формы рельефа соответствуют крупным тектоническим структурам. Это обусловлено не только значимостью

тектонического фактора рельефообразования, но и влиянием состава и возраста пород на рельеф. Самые молодые и наименее устойчивые к выветриванию миоцен-четвертичные отложения, в том числе молассовые толщи, развиты в областях равнинного рельефа — в пределах Северо-Сахалинской равнины и Тымь-Поронайской низменности. Более древние меловые и кайнозойские терригенные породы слагают Западно-Сахалинские горы, а самыми древними скальными кремнисто-терригенно-вулканогенными образованиями триаса — верхнего мела сложены Восточно-Сахалинские горы с наибольшими высотными отметками. Они в большей степени расчленены эрозионными процессами по сравнению с более молодыми западными орогенами [Купцова, 2021].

Материалы и методы исследований. В качестве исходных материалов послужили цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM с разрешением 1 угловая секунда (~30 м) [Цифровая..., 2023], сейсмологические каталоги [International..., 2023; United..., 2023; Сейсмологический..., 2023], космические снимки Landsat 8–9 [База..., 2024], базы данных активных разломов [Zelenin, et al., 2022] и водотоков [Lehner, Grill, 2013].

По ЦМР и схеме водотоков в среде ArcGis построены схемы разности базисных поверхностей и остаточного рельефа, полученной путем вычитания базисной поверхности 3-го порядка из гипсометрической. В использованной нами базе данных водотоков порядок долин определен по методике В.П. Философова [1960]; долины старших (4-го и 5-го) порядков исключены из рассмотрения из-за того, что они не развиты на всей территории острова. Схемы остаточного рельефа и разности базисных поверхностей 1-го и 2-го, 2-го и 3-го порядков отражают направленность неотектонических движений, обуславливающих характер сейсмичности, поэтому они использованы в нашей работе.

Одной из морфометрических характеристик, информативных для понимания особенностей новейших деформаций, является глубина вертикального расчленения рельефа: ее положительные аномалии нередко маркируют области поднятий и зоны повышенной трещиноватости, нарушающие новейший морфоструктурный план [Нетребин, 2012; Философов, 1967]. Глубина вертикального расчленения рассчитана как разность максимальной и минимальной высот в ячейках размерами 15×15 км [Симонов, 1999].

На примере Камчатки [Агибалов и др., 2023] нами было показано, что высокие значения стандартного отклонения экспозиции склонов нередко приурочены к зонам тектонической раздробленности верхней части земной коры. Они отличаются повышенной плотностью линеаментов, выделенных по резким линейным перегибам рельефа, разделяющим разнонаправленные склоны. Значения стандартного отклонения экспозиции склонов определены в ячейках размерами 15×15 км с помощью инструмента «Aspect» программы ArcMap.

Для оценки трещиноватости среды и картирования активных разломов на протяжении многих лет разные авторы проводят структурно-геоморфологическое дешифрирование по методике Н.П. Костенко [1999]. Она предполагает выделение «слабых» зон — линейных элементов рельефа, формирующих блоковую структуру — по комплексу геоморфологических признаков, прежде всего, рисунку гидросети. Эти зоны выделены нами в масштабе 1 : 200 000, и построена схема их плотности.

Нередко активные в новейшее время области отличаются развитием крутых склонов и выделяются по аномалиям гауссовой кривизны рельефа [Агибалов и др., 2021]. Эти параметры определены по ЦМР с помощью инструментов «Slope» и «Curvature». Поскольку знак (положительный или отрицательный) аномалий кривизны рельефа в рамках данной работы не принципиален, соответствующие значения взяты по модулю, а в упомянутых выше ячейках рассчитано стандартное отклонение. Кроме того, определена крутизна разностной поверхности базисов 2-го и 3-го порядков.

При изучении особенностей морфоструктурного плана в последние годы активно используют результаты анализа стохастических моделей рельефа. Эти модели представлены центральными моментами распределений высот земной поверхности в скользящих окнах осреднения [Жаворонкин, Трегуб, 2019]. Таким образом нами были рассчитаны значения двух параметров — стандартного отклонения и асимметрии высот рельефа. Первый определен с использованием модуля «Focal Statistics» программы ArcMap, а второй — с помощью разработанного нами программного обеспечения.

Согласно [ГОСТ..., 2004] вычислены медианные значения и 90%-е доверительные интервалы перечисленных морфометрических параметров на всей территории острова, а также для точек, соответствующих эпицентрам землетрясений, и для малой выборки ($N=14$), состоящей из точек — эпицентров сильных землетрясений с $M_s \geq 5,5$ (табл. 1).

Эти расчеты выполнены для того, чтобы на количественном уровне показать, по каким геоморфологическим характеристикам выделяются участки, где происходят сейсмические события. Сейсмоактивные области оконтурены по изолиниям, соответствующим медианным значениям и 3-му квартилю. В таблицах показано, какой процент эпицентров землетрясений попадает в эти контуры, занимающие 50 и 25% площади территории острова, соответственно. С целью охарактеризовать взаимосвязь между рельефом и активными разломами, последние были разбиты на множество коротких отрезков, концами которых присвоены значения морфометрических показателей. Для этого множества точек ($N=971$) также рассчитаны медианные значения и их доверительные интервалы (см. табл. 1). Кроме того, выраженность активных разломов в рельефе показана благодаря использованию космических снимков

Таблица 1

Сопоставление медианных значений морфометрических параметров рельефа острова Сахалин

Параметр	Медиана и ее доверительный интервал ($\alpha=0,90$)			
	для всего острова	для разрывных нарушений	для всех землетрясений	для землетрясений с $M_s \geq 5,5$
1 Разность гипсометрической поверхности и базисной поверхности 3 порядка, м	83 [82...84]	108 [101...116]	91 [82...101]	141 [79...269]
2 Разность базисных поверхностей 1 и 2 порядков, м	12 [12...13]	16 [13...18]	16 [14...19]	27 [15...52]
3 Разность базисных поверхностей 2 и 3 порядков, м	14 [14...14]	17 [15...20]	17 [14...22]	21 [14...30]
4 Глубина вертикального расчленения рельефа, м	198 [186...211]	353 [318...342]	326 [334...370]	345 [118...530]
5 Стандартное отклонение экспозиции склонов, °	100 [100...100]		102 [101...102]	104 [101...105]
6 Плотность “слабых зон”, км ⁻¹	31 [31...31]		34 [33...34]	36 [32...37]
7 Стандартное отклонение кривизны рельефа, взятой по модулю, $\times 10^3$ м ⁻¹	56 [51...62]	83 [81...88]	83 [79...95]	97 [47...127]
8 Стандартное отклонение высот, м	60 [60...62]	85 [80...87]	68 [61...77]	
9 Асимметрия высот	0,512 [0,509...0,517]	0,720 [0,690...0,751]	0,562 [0,507...0,594]	
10 Крутизна склонов, °	3,6 [3,5...3,6]	4,9 [4,6...5,3]		
11 Кривизна рельефа, взятая по модулю, $\times 10^3$ м ⁻¹	82 [81...83]	93 [87...99]		
12 Крутизна разности базисных поверхностей 2 и 3 порядков, $\times (10^{-3})$ °	79 [78...80]	105 [96...13]		

Примечание: в квадратных скобках приведены доверительные интервалы медиан для $\alpha=0,90$. Пустые ячейки в таблице соответствуют значениям морфометрических параметров, меньше или равны медианам (с учетом доверительного интервала), рассчитанным для всей территории острова.

Landsat 8–9, выполненных в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне (каналы 5–7). На наш взгляд, для о-ва Сахалин оптимальна комбинация каналов 6–7–5. Отметим, что в последние несколько лет, помимо базы данных [Zelenin, et al., 2022], опубликовано большое количество работ, посвященных разломам о-ва Сахалин. Одна из наиболее детальных схем, на которой помимо конфигурации разломов показана их кинематика и приведены решения фокальных механизмов очагов землетрясений, рассмотрена в [Каменев и др., 2024]. Однако анализ этой схемы геоморфологическими методами требует проведения детальных исследований, а для работ регионального масштабного уровня целесообразно использовать данные о наиболее известных и протяженных разломах.

Также в качестве исходных данных использована информация о расположении палеосейсмодислокаций [Булгаков и др., 2002; Лободенко, 2010], сопоставленная с результатами ранее проведенных нами исследований — конфигурацией сейсмодоменов и областей повышенной неотектонической активности, выделенных инструментами нечеткой логики [Sobisevich, et al., 2024].

Результаты и их обсуждение. Сопоставление гипсометрической поверхности и распределения

эпицентров землетрясений свидетельствует о сложности взаимосвязи между сейсмичностью и рельефом: большинство эпицентров локализовано в Западно-Сахалинских горах и на Северо-Сахалинской равнине, в то время как Восточно-Сахалинские горы, где находится наивысшая точка острова, менее активны в сейсмотектоническом отношении. Тем не менее, расчеты медиан и доверительных интервалов морфометрических параметров для всей территории острова и для множества точек — эпицентров землетрясений — показали, что сейсмоактивные области отличаются положительными аномалиями девяти показателей: 1) разности гипсометрической поверхности и базисной поверхности 3-го порядка; 2) разности базисных поверхностей 1-го и 2-го порядков; 3) разности базисных поверхностей 2-го и 3-го порядков; 4) глубины вертикального расчленения; 5) стандартного отклонения экспозиции склонов; 6) плотности «слабых» зон; 7) стандартного отклонения гауссовой кривизны рельефа, взятой по модулю; 8) стандартного отклонения высот; 9) асимметрии высот. При этом активные разломы расположены в области повышенных значений перечисленных морфометрических параметров, исключая плотность «слабых» зон и стандартное отклонение экспозиции склонов, и характеризуются высокой

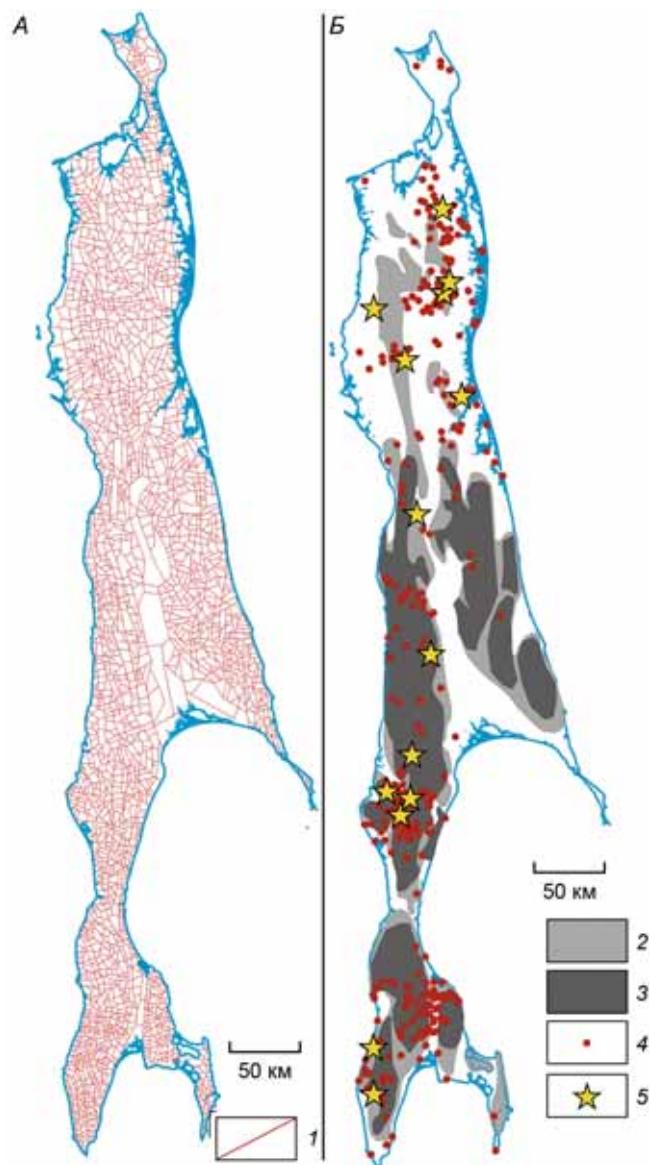


Рис. 2. Схемы «слабых» зон (A) и сейсмоактивных областей о-ва Сахалин, оконтуренных по значениям разности гипсометрической поверхности и базисной поверхности 3-го порядка (Б): 1 — «слабые» зоны; 2–3 — области, где разность гипсометрической поверхности и базисной поверхности 3-го порядка превышает: 2 — медиану (≥ 83 м), 3 — 3-ий квартиль (≥ 220 м); 4 — эпицентры землетрясений, 5 — эпицентры землетрясений с $M_s \geq 5,5$

крутизной склонов, гауссовой кривизной рельефа, взятой по модулю, крутизной разностной поверхности базисов 2-го и 3-го порядков (см. табл. 1). Из данных табл. 2 следует, что сейсмоактивные области

крутизной склонов, гауссовой кривизной рельефа, взятой по модулю, крутизной разностной поверхности базисов 2-го и 3-го порядков: 1) разности гипсометрической поверхности и базисной поверхности 3-го порядка, 2) разности базисных поверхностей 1-го и 2-го порядков, 3) разности базисных поверхностей 2-го и 3-го порядков, 4) глубины вертикального расчленения, 5) стандартного отклонения экспозиции склонов, 6) плотности «слабых» зон, 7) стандартного отклонения гауссовой кривизны рельефа, взятой по модулю, 8) стандартного отклонением высот, 9) асимметрии высот.

Рис. 3. Схема сейсмоактивных областей о-ва Сахалин, выделенных (оконтуренных) по аномалиям морфометрических параметров рельефа. А — по значениям разности базисных поверхностей 1-го и 2-го порядков: 1 — превышающим медиану (≥ 12 м), 2 — превышающим 3-й квартиль (≥ 46 м), 3 — эпицентры землетрясений, 4 — эпицентры землетрясений с $M_s \geq 5,5$. Б — по значениям разности базисных поверхностей 2-го и 3-го порядков: 5 — превышающим медиану (≥ 14 м), 6 — превышающим 3-й квартиль (≥ 50 м). В — по значениям глубины вертикального расчленения рельефа: 7 — превышающим медиану (≥ 198 м), 8 — превышающим 3-й квартиль (≥ 462 м). Г — по значениям стандартного отклонения экспозиции склонов: 9 — превышающим медиану ($\geq 100^\circ$), 10 — превышающим 3-й квартиль ($\geq 105^\circ$). Д — по значениям плотности «слабых» зон: 11 — превышающим медиану ($\geq 31 \text{ km}^{-1}$), 12 — превышающим 3-й квартиль ($\geq 36 \text{ km}^{-1}$). Е — по значениям стандартного отклонения гауссовой кривизны рельефа, взятой по модулю: 13 — превышающим медиану ($\geq 56 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$). Ж — по значениям стандартного отклонения высот рельефа: 14 — превышающим медиану (60 м). З — по значениям асимметрии рельефа: 15 — превышающим медиану ($\geq 0,512$), 16 — превышающим 3-й квартиль ($\geq 0,874$)

могут быть оконтурены по значениям 9-ти упомянутых морфометрических параметров, превышающих медианные. Такие области занимают 50% площади острова, при этом в их контуры попадает 53–62% эпицентров всех землетрясений и 33–86% эпицентров землетрясений с $M_s \geq 5,5$ (рис. 2, 3, табл. 2).

Кроме того, допустимо выделение сейсмоактивных участков по значениям морфометрических характеристик, превышающих 3 квартиль. В этом случае они занимают 25% площади Сахалина, и в них локализовано 28–45% эпицентров всех землетрясений и 21–71% эпицентров землетрясений с $M_s \geq 5,5$ (табл. 3). Наилучший результат (45% всех эпицентров и 71% эпицентров сильных землетрясений) достигнут при использовании схемы плотности «слабых» зон. Высокая сейсмичность острова связана с развитием активных разломов. Согласно табл. 1, они расположены в пределах положительных аномалий большинства перечисленных морфометрических параметров (исключая плотность «слабых» зон и стандартное отклонение крутизны склонов) и отличаются также повышенными значениями крутизны склонов, крутизны разности базисных поверхностей 2-го и 3-го порядка и взятой по модулю гауссовой кривизны рельефа. На рис. 1, Г показано, что большинство разломов выделяются на космических изображениях, выполненных в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне.

Сопоставление расположения 17-ти палеосейсмодислокаций (см. рис. 1, Г) с конфигурацией сейсмодоменов [Sobisevich, et al., 2024] показало, что 9 из них приурочены к границам последних, 11 — попадают в зоны повышенных сжимающих напряжений, а 12 — в области высокой неотектонической активности, выделенных γ -оператором нечеткой логики.

Выводы. Выявлена взаимосвязь между современной сейсмичностью о-ва Сахалин и положительными аномалиями 9-ти морфометрических параметров рельефа: 1) разности гипсометрической поверхности и базисной поверхности 3-го порядка, 2) разности базисных поверхностей 1-го и 2-го порядков, 3) разности базисных поверхностей 2-го и 3-го порядков, 4) глубины вертикального расчленения, 5) стандартного отклонения экспозиции склонов, 6) плотности «слабых» зон, 7) стандартного отклонения гауссовой кривизны рельефа, взятой по модулю, 8) стандартного отклонением высот, 9) асимметрии высот.

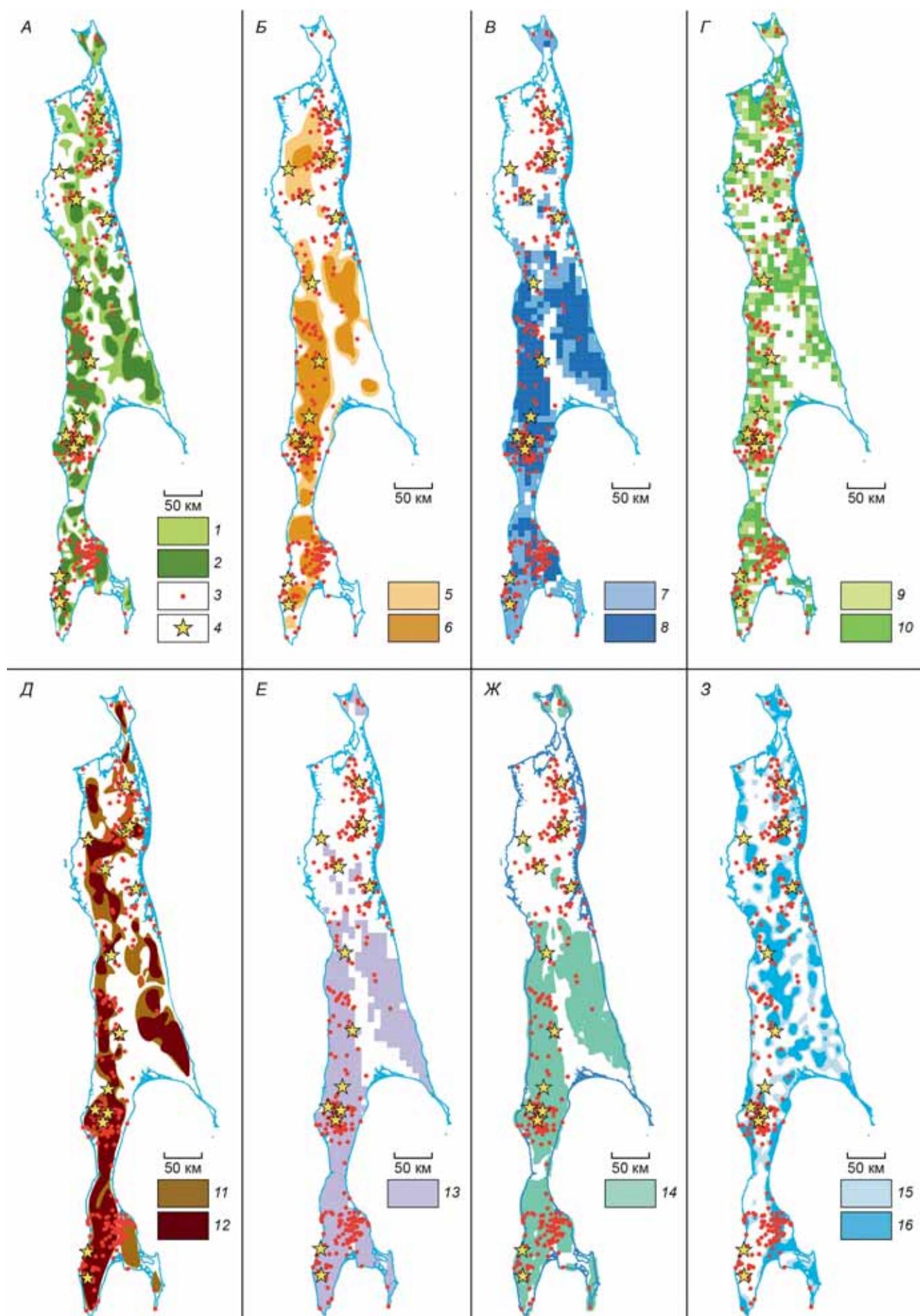


Таблица 2

Доля эпицентров землетрясений, расположенных в пределах областей, где значения морфометрических параметров превышают медианные

Параметр	Доля эпицентров всех землетрясений	Доля эпицентров землетрясений с $M_s \geq 5,5$
1	0,62	0,78
2	0,60	0,78
3	0,56	0,71
4	0,61	0,64
5	0,62	0,86
6	0,62	0,79
7	0,59	0,57
8	0,55	0,40
9	0,53	0,33

Примечание: цифры в первом столбце соответствуют номерам морфометрических параметров рельефа, указанным в табл. 1.

Обоснована возможность оконтуривания сейсмоактивных участков Сахалина по значениям 9-ти упомянутых морфометрических параметров, превышающих медианные. Кроме того, выделение сейсмоактивных областей информативно по значениям 7-ми параметров (исключая стандартное отклонение гауссовой кривизны рельефа и стандартное отклонение высот), превышающим третий quartиль. Наилучший результат достигнут при использовании схемы плотности «слабых» зон: области, где значение этого параметра $\geq 36 \text{ км}^{-1}$, занимают 25% площади острова, в них попадают 45% всех эпицентров землетрясений и 71% эпицентров землетрясений с $M_s \geq 5,5$. На наш взгляд, этот результат методически значим и может быть востребован при оценке сейсмической опасности слабо изученных в сейсмотектоническом отношении территорий.

На количественном уровне показано, что активные разломы связаны с положительными ано-

Таблица 3

Доля эпицентров землетрясений, расположенных в пределах областей, где значения морфометрических параметров превышают 3 квартиль

Параметр	3 квартиль	Доля всех эпицентров землетрясений	Доля эпицентров землетрясений с $M_s \geq 5,5$
1	220 м	0,37	0,43
2	46 м	0,28	0,36
3	50 м	0,28	0,21
4	462 м	0,33	0,36
5	105°	0,29	0,36
6	36 км^{-1}	0,45	0,71
9	0,874	0,31	0,27

Примечание: цифры в первом столбце соответствуют номерам морфометрических параметров рельефа, указанным в табл. 1.

малиями 10-ти морфометрических характеристик: разности гипсометрической поверхности и базисной поверхности 3-го порядка; разности базисных поверхностей 1-го и 2-го, 2-го и 3-го порядков; глубины вертикального расчленения; крутизны склонов; крутизны разности базисных поверхностей 2-го и 3-го порядков; кривизны рельефа, взятой по модулю, и ее стандартного отклонения; стандартного отклонения высот и асимметрии высот.

Финансирование. Исследование проведено в рамках госзаданий ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН, ИГЭ РАН, ГИН РАН и НИР «Моделирование новейших геодинамических процессов, влияющих на сейсмичность и флюидную проницаемость осадочных толщ» (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Благодарности. Авторы выражают благодарность проф. ВГУ А.И. Трегубу и с. н. с. ИВиС ДВО РАН О.В. Бергаль-Кувикас за конструктивные замечания и предложения по дальнейшему развитию структурно-геоморфологических и морфометрических исследований Сахалина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агабалов А.О., Бергаль-Кувикас О.В., Зайцев В.А. и др. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа, характеризующих трещиноватость литосферы, и проявлений вулканизма Малко-Петропавловской зоны // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22, № 2. С. 122–133.

Агабалов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А. и др. Морфометрические параметры рельефа и локализация месторождений углеводородов Волго-Уральской антиклизы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 4. С. 116–128.

База данных спутниковых снимков Lansat 8–9. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (дата обращения: 26.08.2024).

Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У. и др. Активные разломы северо-восточного Сахалина // Геотектоника. 2002. № 3. С. 66–86.

Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разломы Сахалина. М.: Наука, 2007. 187 с.

ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004. Статистические методы. Статистическое представление данных. Медиана. Определение точечной оценки и доверительных интервалов. Дата введения 01.06.2004. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035332> (дата обращения: 10.08.2024).

Жаворонкин О.В., Трегуб А.И. Морфоструктура юго-западного Забайкалья // Вестник ВГУ. Серия геология. 2019. № 4. С. 14–21.

Злобин Т.К. Охотская литосферная плита и модель эволюции системы «окраинное море — островная дуга — глубоководный желоб» // Вестник ДВО РАН. 2006. № 1. С. 26–32.

Каменев П.А., Дягтерев В.А., Жердева О.А. и др. Кинематика разрывных нарушений Сахалина по гео-

логическим и сейсмологическим данным // Геосистемы переходных зон. 2024. Т. 8, № 1. С. 37–46.

Короновский Н.В. Геология Россия и сопредельных территорий. М.: Академия, 2011. 240 с.

Костенко Н.П. Геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1999. 398 с.

Купцова О.В. Анализ современного состояния разломов на Сахалине // Нефтегазовый комплекс: проблемы и решения: Мат-лы Третьей национальной научно-практической конференции с международным участием. Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2021. С. 75–78.

Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31, № 5. С. 93–103.

Лободенко И.Ю. Голоценовые тектонические нарушения (палеосейсмодислокации) в зонах Хоккайдо-Сахалинского Центрально-Сахалинского разломов: Дисс. канд. геол.-мин. н. М., 2010. 166 с.

Мельников О.А. Остров Сахалин: его геологическое прошлое, настоящее и вероятное будущее // Вестник Сахалинского музея. 2010. № 1. С. 262–273.

Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области. М.: Наука, 1987. 95 с.

Нетребин П.Б. Морфометрический анализ рельефа Большого Кавказа: Дисс. канд. геогр. наук. Краснодар, 2012. 227 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 4. Сахалин и Курилы / Под ред. М.Г. Васьковского. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 262 с.

Рогожин Е.А. Тектоника очага зоны Нефтегорского землетрясения 27 (28) мая 1995 г. на Сахалине // Геотектоника. 1996. № 2. С. 45–53.

Сапрыгин С.М. О детальном сейсмическом районировании Сахалина // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 2. С. 72–79.

Сейсмологический каталог Единой геофизической службы РАН. URL: <http://www.ceme.gssras.ru/cgi-bin/new/catalog.pl> (дата обращения: 01.01.2023).

Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В. и др. Неотектоника и неотектонические напряжения острова Сахалин // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 1. С. 181–202.

Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 251 с.

Уломов В.И. Экспертное заключение по оценке сейсмической опасности районов строительства береговых объектов проекта «Сахалин-1». Дата документа 04.11.2003. URL: http://seismos-u.ifz.ru/documents/sakhalin_expert_ulomov.pdf (дата обращения: 12.07.2023).

Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1960. 96 с.

Философов В.П. Методика вычисления и геологогеоморфологическая интерпретация коэффициента расчлененности рельефа // Вопросы морфометрии. 1967. Т. 1, вып. 2. С. 112–146.

Цифровая модель рельефа. URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1nv003/> (дата обращения: 13.07.2023).

International seismological catalogue URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue> (дата обращения: 01.01.2023).

Lehner B., Grill G. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems // Hydrological Processes. 2013. Vol. 27. P. 2171–2186.

Sobisevich A.L., Steblov G.M., Agibalov A.O., et al. Seismic domain identification algorithm using fuzzy logic methods with combined geological and geomorphological data for the case of Sakhalin Island // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Vol. 24, No. 2. P. 1–8.

United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (дата обращения: 01.01.2023)

Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., et al. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. 2022. Vol. 14. P. 4489–4503.

Статья поступила в редакцию 04.09.2024, одобрена после рецензирования 30.10.2024, принята к публикации 25.01.2025