

УДК: 528.88+551.24+004.93

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-346-360

В.А. Мелкий¹, О.В. Купцова², А.А. Верхотуров³

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ В РАЙОНЕ ПЕРЕШЕЙКА ПОЯСОК (САХАЛИН) ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Автоматизированное картографирование нарушений сплошности земной коры позволяет оперативно выявлять участки развития опасных геологических процессов, и определить меры, которые следует предпринять для организации безопасной эксплуатации протяженных линейных сооружений (автомобильных и железных дорог, трубопроводов, линий электропередач), пролегающих через территории со сложными природными условиями. Основным триггерным механизмом, вызывающим активизацию опасных геологических процессов, являются смещения в зонах активных разрывных нарушений в земной коре. Мониторинг состояния разломных зон и своевременное выявление проявлений опасных процессов — актуальные задачи обеспечения устойчивого развития региональной инфраструктуры. В качестве объекта исследования был выбран район перешейка Поясок (о. Сахалин), по территории которого проходят автомобильная и железная дороги, линии электропередач, а по побережью перешейка проложен магистральный трубопровод проекта «Сахалин-2». Для выявления разрывных нарушений исследуемой территории производился линеаментный анализ спутниковых снимков и данных SRTM с помощью программного комплекса LEFA методом бинарно-морфологической эрозии для детектирования границ, а также отбор протяженных линий посредством выполнения операций по математическим алгоритмам Кэнни с последующими преобразованиями Хафа. Полученные промежуточные данные обрабатывались при помощи инструментария программного комплекса QGIS и позволили составить карту дизъюнктивных нарушений для изучаемой местности. Линеаментный анализ позволил выделить разломы, ограничивающие блоковую мегаструктуру перешейка Поясок с севера и юга. Седловина перешейка Поясок разделяет крупные Центрально-Сахалинский и Южно-Сахалинский сегменты Хоккайдо-Сахалинской системы островных поднятий. Непосредственно к седловине примыкают структуры Центрально-Камышового и Южно-Камышового блоковых мегаподнятий (3 порядка) в Западно-Сахалинских горах. Южная часть Центрально-Камышового мегаподнятия представлена серией поднятий, разделенных узкими впадинами, ограниченными разломами. Количество поднятий увеличивается с удалением к северу от перешейка Поясок. Северная часть Южно-Камышового мегаподнятия разделена разломами северо-восточного простирания на клавишные блоковые структуры. Полученные данные пригодны для выполнения детального сейсмрайонирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционное зондирование, геоинформационное картографирование, опасные геологические процессы, разломы

¹ Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, лаборатория вулканологии и вулканопасности, ул. Науки, д. 1Б, Южно-Сахалинск, Россия, 693022, *e-mail:* vamelkiy@mail.ru

² Сахалинский государственный университет, Технический нефтегазовый институт, ул. Пограничная, д. 2, Южно-Сахалинск, Россия, 630023, *e-mail:* Korsuncevaolesy@gmail.com

³ Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Центр коллективного пользования, ул. Науки, д. 1Б, Южно-Сахалинск, Россия, 693022, *e-mail:* ussr-91@mail.ru

Vyacheslav A. Melkiy¹, Olesya V. Kuptsova², Alexey A. Verkhoturov³

**AUTOMATED MAPPING OF FAULTS
IN THE AREA OF POYASOK ISTHMUS (SAKHALIN)
BY REMOTE SENSING DATA**

ABSTRACT

Automated mapping of disturbances in the earth's crust allows you to quickly identify areas of development of dangerous geological processes, and to determine the measures that should be taken to organize the safe operation of extended linear structures (roads and railways, pipelines, power lines) that run through areas with difficult natural conditions. The main trigger mechanism causing the activation of dangerous geological processes is displacements in zones of active faults in the earth's crust. Monitoring the state of fault zones and timely detection of manifestations of hazardous processes are urgent tasks for ensuring the sustainable development of regional infrastructure. The area of the Poyasok isthmus (Sakhalin Island) was chosen as the object of research, along the territory of which there are automobile and railway roads, power lines, and the main pipeline of the Sakhalin-2 project was laid along the isthmus coast. Lineament analysis of space images and SRTM data using the LEFA software package by binary morphological erosion method to highlight boundaries, as well as made selection long lines by performing mathematical operations using Canny algorithms, with subsequent Hough transformations, were carried out to identify faults of research territory. The obtained intermediate data were processed using the tools of the QGIS software package and made it possible to compile a map of disjunctive disturbances for the area under study. Lineament analysis made it possible to identify faults that bound the block megastructure of the Poyasok isthmus from the north and south. The saddle of Poyasok isthmus separates the large Central Sakhalin and South Sakhalin segments of the Hokkaido-Sakhalin system of island uplifts. Structures of the Central-Kamyshovy and South-Kamyshovy lifted megablocks (3 orders) in the West-Sakhalin Mountains adjoin directly to the saddle. The southern part of the Central-Kamyshovy mega-uplift is represented by a series of uplifts separated by narrow depressions bounded by faults. The number of uplifts increases with the distance to the north from the Poyasok isthmus. The northern part of the South-Kamyshovy mega-uplift is divided by faults of the northern-east strike into block structures. The obtained data are suitable for performing detailed seismic zoning.

KEYWORDS: remote sensing, geoinformation mapping, dangerous geological processes, faults

ВВЕДЕНИЕ

Основными опасными геологическими процессами, оказывающими воздействие на протяженные линейные сооружения (автомобильные и железные дороги, трубопроводы, кабельные линии подземного проложения), являются смещения в зонах активных разрывных нарушений в земной коре. Диагностика на наличие потенциально опасных участков разломных зон территории, планируемой для строительства линейных

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Laboratory of volcanology and volcanic danger, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, *e-mail:* vamelkiy@mail.ru

² Sakhalin State University, Technical Oil and Gas Institute, 2, Pogranichnaya str., Yuzhno-Sakhalinsk, 630023, Russia, *e-mail:* Korsuncevaolesy@gmail.com

³ Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Center for collective use, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, *e-mail:* ussr-91@mail.ru

сооружений, должна проводиться на стадии инженерных изысканий. Необходимо выявить места пересечения трасс линейных сооружений разрывными нарушениями земной коры и обратить особое внимание при проектировании, чтобы организовать постоянный мониторинг при эксплуатации в местах возможных подвижек грунтовых масс. Исследования геологических условий территории традиционно выполняются посредством полевого геологического опробования, геофизических и геодезических измерений. Традиционные методы являются достаточно высокоточными, однако они способны охватить сравнительно небольшую площадь, требуют привлечения существенных трудовых и финансовых ресурсов. Поэтому для изучения больших территорий целесообразно использовать данные дистанционного зондирования Земли, для обработки которых применять методы геоинформационного анализа, получившие в настоящее время широкое распространение.

Методы дешифрирования космических снимков территорий с целью определения их состояния рассматриваются в работах многих исследователей [Карпик, 2004; Малинников и др., 2009; Барталев и др., 2015; Братков и др., 2020; Аковецкий и др., 2021; Кравцова, 2021; Романюк и др., 2022] в связи с освоением новых территорий, подверженных воздействию опасных геологических процессов. Большой интерес вызывают работы, в которых представлены результаты исследования территорий с помощью методов линеаментного анализа и моделирования геотехнических систем [Бондур, Зверев, 2005; Зверев и др., 2005; Савиных и др., 2012; Долгополов и др., 2022; Mercante, Antunes, 2010].

В значительной степени экономика и социальное развитие о. Сахалин зависят от экспорта энергоносителей: остров обладает значительными запасами углеводородов и другими невозобновляемыми и возобновляемыми энергетическими ресурсами. В Восточной Азии активно развиваются процессы экономической интеграции, которые характеризуются разнонаправленными и трудно прогнозируемыми изменениями обстановки. Для оптимизации управления энергетическим сектором необходимо использовать систему поддержки принятия решений. В статье рассматриваются возможности использования автоматизированного дешифрирования для выявления разломов в целях обеспечения безопасной эксплуатации сооружений и устойчивое развитие экономики острова в условиях широкого спектра рисков и угроз в рамках концепции Цифровой Земли [Мелкий и др., 2017; Hiromichi et al., 2021].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа разрывных нарушений различного ранга используются снимки разного масштаба и обзорности. Чем меньше масштаб и разрешение снимка, тем более крупного ранга линеаменты будут на нем отображаться. Соответственно для уточнения региональных и локальных разрывов отбирались спутниковые снимки Landsat-8, разрешение которых было различным:

- 15 м — в панхроматическом канале, что соответствовало масштабу 1: 100 000;
- 30 м — в каналах коротковолновой, видимой красной и ближней инфракрасной зон электромагнитного спектра, которые соответствовали масштабу 1: 150 000;
- 100 м — в тепловом инфракрасном диапазоне, соответствующие масштабу 1: 500 000.

При исследовании территории использовались цифровые модели рельефа на основе SRTM, разрешение которых составляет от 1 до 3", т. е. от 30 до 90 м. Данные космических съемок Landsat-8¹ и SRTM скачивались с вебсайта Геологической службы США USGS² в формате с географической привязкой GeoTIFF. На территорию исследования были отобраны космические снимки с низким облачным покрытием (табл. 1).

Табл. 1. Характеристика сцен Landsat 8, выбранных для исследования
Table 1. Characteristics of the Landsat 8 scenes selected for the research

Спутник / сканер	Идентификатор сцены	Разрешение, м	Дата съемки	Облачность над объектом (%)
Landsat 8 / OLI	108027_20190909	15–30	09.09.2019	0,26
Landsat 8 / OLI	108027_20190917	15–30	17.09.2019	0,00
Landsat 8 / OLI	108027_20180204	15–30	04.02.2018	0,00
Landsat 8 / OLI	108027_20170403	15–30	03.04.2017	0,00
Landsat 8 / OLI	108027_2015241	15–30	29.08.2015	0,24
Landsat 8 / OLI	108027_20150930	15–30	30.09.2015	0,00
Landsat 8 / OLI	108027_20151016	15–30	16.10.2015	0,00

На первом этапе обработки снимков были выполнены: оценка точности позиционирования, определение влияния отражения электромагнитных волн от поверхности Земли, а также отражательной способности поверхности, рассеивающей способности атмосферы [Kuptsova et al., 2021]. Последующая обработка проводилась непосредственно в процессе дешифрирования.

Выделение разломов производилось на основе принципов «множественности» и «комплексности» последовательной обработки спутниковых данных, позволяющих повысить достоверность дешифрирования с помощью линеаментного анализа. Принцип «множественности» реализован в использовании целой серии снимков исследуемой территории, различных по времени съемки. Принцип «комплексности» применен при последовательном дешифрировании снимков, различных по обзорности, спектральному диапазону, масштабу и разрешению [Купцова и др., 2021]. Программное обеспечение комплексов QGIS и LEFA [Шевырев, 2018] позволило выполнить автоматизированное дешифрирование и анализ линеаментных структур исследуемой территории. Изображения поверхности данными SRTM и Landsat обрабатывались с помощью операции бинарно-морфологической эрозии для детектирования границ, а также посредством выполнения действий по математическим алгоритмам Кэнни [Купцова и др., 2021; Canny, 1986].

Объекты изображения представлены в формуле (1) в виде множества A всех фоновых точек-пикселей. Эрозия обрабатываемого изображения A по структурному элементу B — это множество всех точек z , при попадании в которые элемент B полностью содержится в множестве A , что позволяет выделить линейные элементы рельефа в виде штрихов:

¹ Landsat Quality Assessment ArcGIS Toolbox. United States Geological Survey (USGS) website. Электронный ресурс: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-quality-assessment-arcgis-toolbox> (дата обращения 25.01.2023).

² USGS EROS Archive. Digital Elevation — Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey). Электронный ресурс: <https://glovis.usgs.gov/aP> (дата обращения 25.01.2023).

$$A \ominus B = \{z | (B)z \subseteq A\}, \quad (1)$$

где $A \in Z^2$, $B \in Z$ [Canny, 1986].

Дальнейшая обработка изображения в программе LEFA выполняется посредством преобразований Хафа [Хие, Пан, 2009]. Протяженные линеаменты, трассирующие основные глубинные разломы, определяются с помощью алгоритма Хафа с помощью теории вероятности с учетом коллинеарности. Трансформация Хафа предназначена для упрощения группировки граничных точек в наборы с определенными параметрами. Прямую можно задать либо уравнением $y = kx + b$, либо в виде формулы (2):

$$y = \left(-\frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right)x + \left(\frac{r}{\sin \theta}\right) \quad (2)$$

Через любую точку на плоскости может проходить бесконечно много прямых. Так для точки с координатами (x_0, y_0) это будут прямые, описываемые формулой (3):

$$r(\theta) = x_0 \times \cos \theta + y_0 \times \sin \theta, \quad (3)$$

где r — расстояние от начала координат до ближайшей точки на прямой;
 θ — угол между осью x и линией, соединяющей начало координат с ближайшей точкой.

Ряд точек, которые формируют прямую линию, определяют синусоиды, которые пересекаются в точке параметров (r_0, θ_0) для этой линии, поэтому обнаружение коллинеарных точек сводится к обнаружению пересекающихся кривых. На изображении, выстроенном в полярных координатах, достаточно выбрать наиболее крупные пятна для обнаружения соответствующих прямых [Кудрина, 2014; Ballard, 1981].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Автоматизированное дешифрирование нарушений территории перешейка Поясок, выполненное с помощью инструментария программного обеспечения LEFA с использованием методов линеаментного анализа, позволило определить не только местонахождение разломов, но и проанализировать определенные характеристики разрывных нарушений: определить их длину и ширину области влияния.

Технология дешифрирования линеаментных структур с целью выявления разрывных нарушений

Обработка изображений SRTM и Landsat проводилась комплексом методов многоступенчатых алгоритмов. Работа с данными позволила выявить дизъюнктивные нарушения исследуемой территории (рис. 1).

Программное обеспечение QGIS использовалось для анализа результатов дешифрирования линеаментов и построения карты. Карта разломов строилась путем суммирования шейп-файлов линий и штрихов на основе их комплексного анализа по предлагаемой технологии (рис. 2). Комплексирование всех обработанных изображений в разных зонах спектра позволило выделить наиболее достоверные зоны разрывных нарушений. Путем наложения данных дешифрирования SRTM и спутниковых снимков линеаменты были отфильтрованы, при этом исключены те, которые не подтверждены другими параметрами и не относящиеся к разрывным нарушениям. В результате

построен новый слой подтвержденных дизъюнктивных нарушений и создана карта дизъюнктивных нарушений.

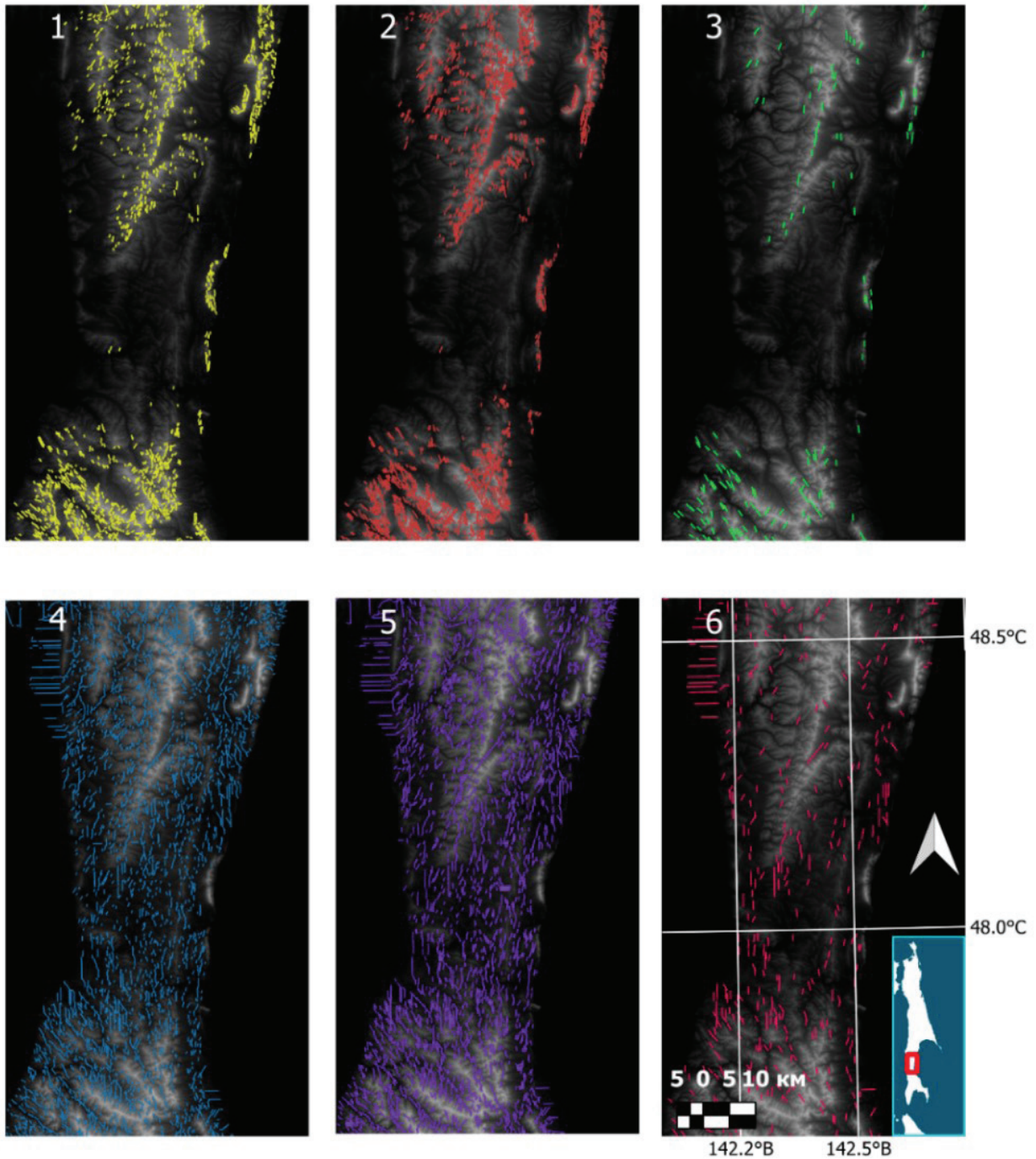


Рис. 1. Фрагменты космических снимков с линеаментами, выделенными в программе LEFA при использовании инструментария, работающего на различных алгоритмах: 1 — Canny many; 2 — Canny medium; 3 — Canny small; 4 — Erosion many; 5 — Erosion medium; 6 — Erosion small

Fig. 1. Fragments of satellite images with lineaments identified in the LEFA program using tools that work on various algorithms: 1 — Canny many; 2 — Canny medium; 3 — Canny small; 4 — Erosion many; 5 — Erosion medium; 6 — Erosion small

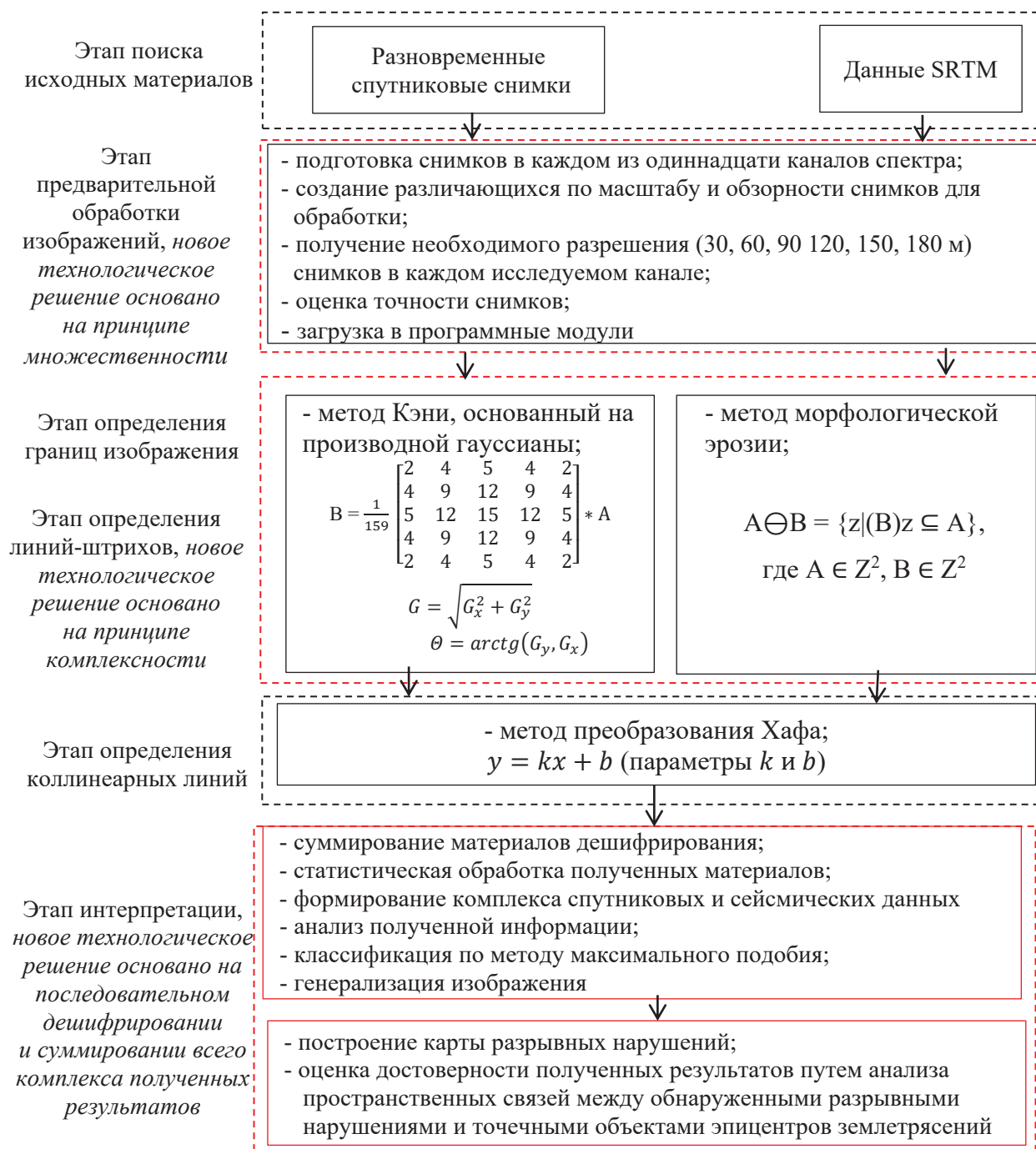


Рис. 2. Технология дешифрирования с целью выявления разрывных нарушений

Fig. 2. Decryption technology to detect disjunctive violations

Исследуемая территория в тектоническом плане относится к Хоккайдо-Сахалинской системе островных поднятий [Сергеев, 1982]. В рельефе структура представлена антиклинорием Западно-Сахалинских гор. Седловина перешейка Поясок разделяет крупные Центрально-Сахалинский и Южно-Сахалинский сегменты-поднятия. Непосредственно к седловине примыкают структуры Центрально-Камышового и Южно-Камышового блоковых мегаподнятий (3 порядка), состоящие из более мелких блоков, разделенных разломами (рис. 3).

В программе LEFA нет ограничений по числу направлений сторон света, поэтому показываются линейные штрихи и протяженные линеаменты во всех направлениях, изображенных на карте. Роза-диаграмма строится максимум по 32 основным направлениям разрывных нарушений. Для диаграммы, отображающей линейные нарушения, не имеет значения ориентация линий. Направления с севера на юг и с юга на север рассматриваются как равнозначные, поэтому вместо $0-360^\circ$ берется $0-180^\circ$, т. к. линии с противоположными направлениями попадают в ячейку одного направления. Роза-диаграмма, отображающая преобладающие направления разломов территории, показана также на рис. 3.

Анализ структурной позиции и картографирование разрывных нарушений в районе перешейка Поясок

Зоны наиболее крупных протяженных выделены при линеаментном анализе с помощью алгоритма Хафа на западной и восточной окраинах изученной территории, расположенной севернее перешейка Поясок. Западный склон антиклинория Центрально-Камышового поднятия ограничен бортом Южно-Татарского рифтового грабена, представленным ступенчатым сбросом по серии субмеридиональных разрывных нарушений в зоне Западно-Сахалинского разлома. С восточной стороны изучаемого участка четко выделяются разрывные нарушения Центрально-Сахалинской разломной зоны, расположенной на границе Ильинско-Макаровской антиклинали Центрально-Камышового мегаподнятия и Терпениевской мегавпадины. Вдоль берега о. Сахалин в заливе Терпения протянулись с севера на юг Макаровский и Фирсовский прогибы, по-видимому, также имеющие рифтообразную структуру. В пользу рифтогенной природы грабенов, ограничивающих антиклинорий с запада и востока, свидетельствуют признаки молодого вулканизма по их периферии и повышенный тепловой поток. Особенно высокими значениями теплового потока выделяются наиболее погруженные участки впадин, где его величина находится в пределах $60-80 \text{ мВт/м}^2$ [Веселов и др., 2006].

Литосферные надрегиональные разломы выделялись в работах многих исследователей [Рождественский, 1982; Стрельцов, Кожурин, 2002; Воейкова и др., 2007; Ломтев, Жердева, 2015], отражены в базе данных разломов Евразии, где представлены их основные характеристики [Харахинов и др., 1984; Бачманов и др., 2017] (табл. 2). Крупные разломы и разломные зоны отчетливо проявились при автоматизированном дешифрировании линеаментов.

Табл. 2. Характеристика основных глубинных разломов перешейка Поясок
Table 2. Characteristics of the main deep faults of the isthmus Poyasok

Название	Амплитуда смещений (км)		Размеры (км)		Морфология, тип
	горизонт	вертикал	ширина	протяженность	
Западно-Сахалинский	≈3–5	≈1,5	≈10	> 1000	Взбросо-сдвиг
Центрально-Сахалинский	≈5–7	≈2,0	≈10	> 1000	Сброс, взбросо-сдвиг

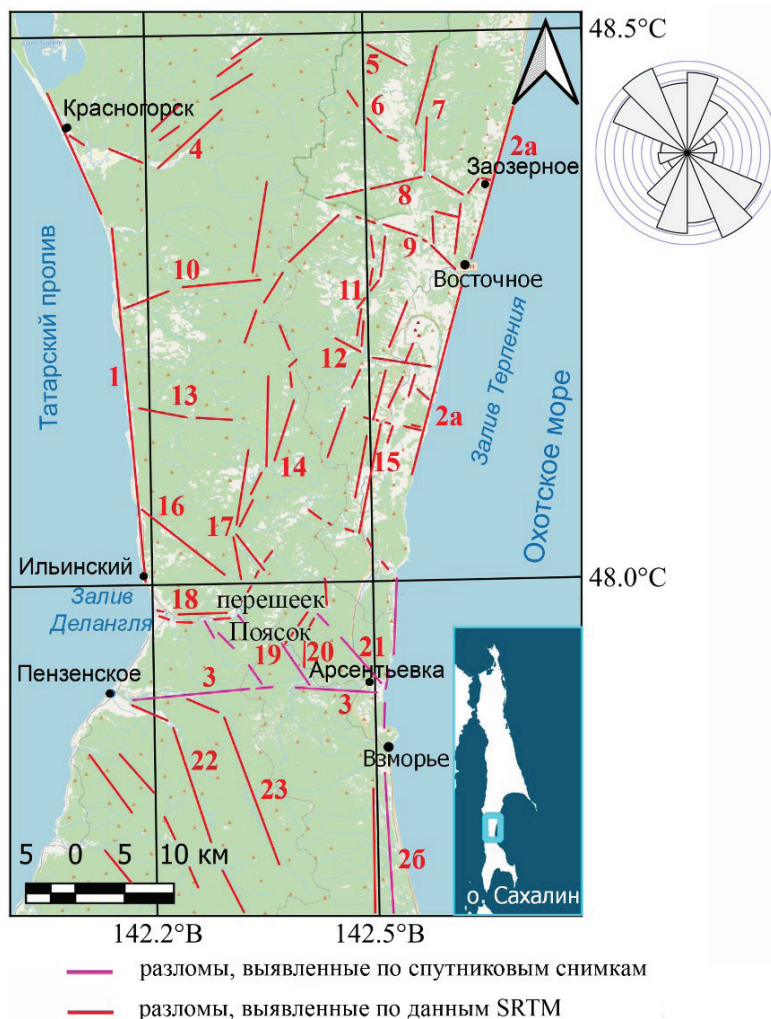


Рис. 3. Схема разломов и разломных зон исследуемой территории: 1 — Ильинско-Парусный фрагмент Западно-Сахалинского разлома; 2а — Терпеневский фрагмент Центрально-Сахалинского разлома; 2б — Арсентьевско-Тепловодский фрагмент Центрально-Сахалинского разлома; 3 — Мануй-Черемшанская зона; 4 — Заломовский; 5 — Араксовский; 6 — Званкинский; 7 — Лазовская зона; 8 — Малахитовский; 9 — Восточный; 10 — Белинский; 11 — Юлай-Пугачевская зона; 12 — Емельяновско-Пугачевский; 13 — Енисейский; 14 — Повитухинский; 15 — Травяно-Тиховская зона; 16 — Софийско-Колесницкий; 17 — Пахомовско-Ильинский; 18 — Ильинская зона; 19 — Комогоркинский; 20 — Моховской; 21 — Казанский; 22 — Старицкий; 23 — Верхне-Черемшанский. Роза-диаграмма направленности разломов показана вверху справа

Fig. 3. Diagram of faults and fault zones of the research territory: 1 — Ilyinsko-Parusny fragment Zapadno-Sakhalinskaya fault zone; 2a — Terpenievsky fragment Tsentral'no-Sakhalinskaya fault zone; 2b — Arsentievsko-Teplovodsky fragment Tsentral'no-Sakhalinskaya fault zone; 3 — Manuj-Cheremshanskaya zone; 4 — Zalomovsky fault; 5 — Araksovsky; 6 — Zvankinsky; 7 — Lazovskaya fault zone; 8 — Malakhitovsky; 9 — Vostochny; 10 — Belinsky; 11 — Yulaj-Pugachevskaya fault zone; 12 — Emelyanovsko-Pugachevsky; 13 — Eniseysky; 14 — Povitukhinsky; 15 — Travyano-Tikhovskaya fault zone; 16 — Sofiysko-Kolesnitsky; 17 — Pakhomovsko-Ilyinsky; 18 — Ilyinskaya fault zone; 19 — Komogorkinsky; 20 — Mokhovskskoj; 21 — Kazansky; 22 — Staritsky; 23 — Verkhne-Cheremshansky. Rose-diagram of orientation of faults is shown at the top right

Разломные зоны регионального масштаба ранее исследовались не так активно, как надрегиональные, поэтому ряд разломов выделен в результате линеаментного анализа на исследуемой территории впервые. Ортогональные разломы исследуемого района Малахитовский (8), Белинский (10), Енисейский (13), Пахомовско-Ильинский (17), а также Ильинская зона (18) разрывных нарушений играют второстепенную роль в формировании современного структурного плана рельефа. Широкие крупные разломы встречаются редко и проявляются в виде сбросо-сдвигов.

На исследованной территории ведущая роль принадлежит диагональной сети разломов. Использование алгоритма Erosion medium позволило выделить ряд разломных зон северо-восточного простирания: Лазовскую (7), Юлай-Пугачевскую (11) и Травяно-Тиховскую (15). В этом же направлении проявились разломы: Заломовский (4), Повитухинский (14), Комогоркинский (19) и Моховской (20).

Большое количество линеаментов северо-восточного направления, характерных для территории, ограниченной периметром Арсентьевка – Пензенское – Красногорск – Заозерное разграничивает структуры поднятий и глубоко врезаемых долин 4-го порядка. Для территории характерен структурно-эрозионный тип рельефа. Гряды положительных складок в большинстве своем ориентированы в направлениях, совпадающих со структурным планом территории, имеют асимметричную крутизну склонов, моноклинальное залегание пластов. Аструктурный склон — крутой, другой склон, совпадающий по падению с залеганием пластов, более плавно опускается в долину. Направление гряд поднятий обусловлено простиранием выходов устойчивых к размыву пластов позднемеловых, палеогеновых и неогеновых пород. Высота гряд зависит от интенсивности новейших поднятий, свойственных сахалинской позднеоген-четвертичной ($N_2^3-Q_1$) фазе складчатости, и колеблется в гребнях хребтов от 200 до 850 м. Подобного рода гряды образуют главный водораздел Центрально-Камышового мегаподнятия. Для гидросети в условиях структурно-эрозионного рельефа характерен решетчатый рисунок.

При помощи алгоритмов Erosion many и Erosion medium хорошо выявляется близость линеаментных линий по разломам северо-западного простирания: Званкинскому (6), Восточному (9), Емельяновско-Пугачевскому (12), Софийско-Колесницкому (16), Казанскому (21), Старицкому (22) и Верхне-Черемшанскому (23). Развитие подобного рода аструктурного эрозионного рельефа возникает в районах локальных осложнений складчатой структуры, что возможно вблизи крупных разломов, где в зонах активного дробления и переслаивания отложений пород происходит интенсивное эрозионное расчленение.

Очаги землетрясений, как правило, расположены вдоль протяженных зон активных разломов и других наименее прочных структур земной коры. Выявление местоположения сейсмоактивных, а следовательно — сейсмоопасных геологических структур заложено в основу сейсмического районирования. Идентификация зон возникновения очагов землетрясений и определение параметров их сейсмического режима является самым сложным и наиболее ответственным звеном в исследованиях по сейсмическому районированию, поскольку от этого зависит надежность всех последующих построений [Уломов, Шумилина, 1999]. При проведении работ по детальному сейсмическому районированию территории, которое необходимо учитывать при проектировании объектов промышленного и гражданского назначения, следует использовать данные о местоположении выявленных разрывных нарушений [Уломов, 2008].

ВЫВОДЫ

Линеаментный анализ позволил выделить зоны литосферных надрегиональных разломов, ограничивающих самую узкую часть Хоккайдо-Сахалинской системы островных поднятий с запада и востока. В результате уточнена пространственная позиция крупных разломов в пределах трансрегиональных зон: ранее положение этих разломов разными исследователями определялось не однозначно. Выявленные зоны оконтуривают структуру Центрально-Камышового блокового мегаподнятия (3 порядка) Западно-Сахалинского антиклинория и показывают, что ступенчатые взбросы поднятого крыла в бортах соседних Южно-Татарского, Макаровского и Фирсовского грабенов четко проявляются в береговых уступах. Седловина перешейка Поясок разделяет крупные Центрально-Сахалинский и Южно-Сахалинский сегменты Хоккайдо-Сахалинской системы островных поднятий. Выявлено, что блоковая структура перешейка Поясок имеет в плане треугольную форму, слабо приподнятую денудационную поверхность; скорость вертикальных движений в его пределах замедлена по сравнению со структурами, расположенными южнее и севернее. В рамках территории, выбранной для исследования, выявлено, что перешеек Поясок разделяет участки с преобладанием разрывных нарушений различной господствующей направленности. Если гряды Центрально-Камышового блокового мегаподнятия образуют структурно-эрозионный тип рельефа, то в северной части Южно-Камышового мегаподнятия доминируют довольно крупные антиклинальные неотектонические структуры, ограниченные разломами северо-западного простирания Верхне-Черемшанским, Старицким и им подобным. Генеральное направление геодинамического воздействия определяет пространственное положение изосейст местных землетрясений, поэтому полученные данные целесообразно использовать при построении карт детального сейсмораионирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта Правительства Сахалинской области в форме субсидии молодым ученым на реализацию научно-исследовательского проекта (Постановление ПСО № 486 от 27.10.2022 г.), выданного Министерством цифрового и технологического развития Сахалинской области (Протокол № 2 от 12.12.2022 г).

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was performed with the support of a grant from the Government of the Sakhalin Region in the form of a grant to young scientists for the implementation of a research project (GSR Resolution No. 486 of 27.10.2022), issued by the Ministry of Digital and Technological Development of the Sakhalin Region (Protocol No. 2 of 12.12.2022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В., Ильченко А.А.* Аэрокосмический мониторинг в задачах оценки геоэкологических рисков аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. Вычислительные технологии, 2021. Т. 26. № 1. С. 72–85. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.1.006.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А.* Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. № 12 (5). С. 203–221.
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г.* База данных активных разломов Евразии. Геодинамика и тектонофизика, 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов. Исследования Земли из космоса, 2005. № 3. С. 37–52.

- Братков В.В., Воробьев В.А., Мелкий В.А., Верхотуров А.А.* Картографирование динамики растительных сообществ северной части бореальных лесов острова Сахалин на основе данных дистанционного зондирования Земли. Мониторинг. Наука и технологии, 2020. № 3 (45). С. 6–13. DOI: 10.25714/MNT.2020.45.001.
- Веселов О.В., Грецкая Е.В., Ильев А.Я., Кононов В.Э., Кочергин Е.В., Патрикеев В.Н., Семанкин В.П., Сеначин В.Н., Агеев В.Н., Васюк И.Б., Волгин П.Ф., Злобина Л.М., Жигулев В.В., Корнев О.С., Кочергин А.В., Куделькин В.В.* Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря. М.: Наука, 2006. 130 с.
- Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И.* Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 2007. 185 с.
- Долгополов Д.В., Мелкий В.А., Баборыкин М.Ю.* Применение технологий дистанционного зондирования Земли для обеспечения геотехнического мониторинга и картографирования на трубопроводном транспорте. Региональные геосистемы, 2022. Т. 46. № 3. С. 339–355. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355.
- Зверев А.Т., Малинников В.А., Ареллано-Баеса А.* Изучение динамики линеаментов, вызванных землетрясениями в Южной Америке, с применением линеаментного анализа данных спутника ASTER (TERRA). Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2005. № 5. С. 56–65.
- Карпик А.П.* Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: монография. Новосибирск: Сибирская гос. геодез. акад. (СГГА), 2004. 259 с.
- Кравцова В.И.* Возможности сравнения разновременных снимков различного разрешения при исследованиях динамики северных дельт. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 1. С. 277–291. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-277-291.
- Кудрина М.А.* Использование преобразования Хафа для обнаружения прямых линий и окружностей на изображении. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. Т. 16. № 4 (2). С. 476–478.
- Купцова О.В., Верхотуров А.А., Мелкий В.А.* Картографирование разломов на территории Северо-Сахалинской равнины по данным дистанционного зондирования земли. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 1. С. 317–329. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-317-329.
- Ломтев В.Л., Жердева О.А.* К сейсмостектонике Сахалина: новые подходы. Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2015. № 3. С. 56–68.
- Малинников В.А., Алтынов А.Е., Попов С.М., Стеценко А.Ф.* Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами. М.: МИИГАиК, 2009. 140 с.
- Мелкий В.А., Тихунова И.Н., Еремченко Е.Н., Черешня О.Ю., Хиромичи Фукуи, Марта С., Тахджана Я.* Геоинформационная поддержка принятия решений по использованию энергетических ресурсов Сахалина. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2017. Т. 23. Ч. 3. С. 132–143. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-132-143.
- Рождественский В.С.* Роль сдвигов в формировании структуры о. Сахалин. Геотектоника, 1982. № 4. С. 99–111.

Романюк В.А., Пищальник В.М., Зарубина Д.В. Анализ вариаций ледовитости Охотского моря на основе авиационных и спутниковых наблюдений. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 5–34. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-441-449.

Савиных В.П., Малинников В.А., Учаев Д.В., Учаев Дм.В. Автоматизированная технология дешифрирования и анализа линейных и кольцевых структур на космических изображениях. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2012. № 6. С. 53–65.

Сергеев К.Ф. О тектонической природе поднятия Западно-Сахалинских гор. Тихоокеанская геология, 1982. № 1. С. 75–83.

Стрельцов М.И., Кожурин А.И. Активные разломы и катастрофические землетрясения Сахалина (Апреловский активный разлом, результаты тренчинга). Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики Сахалинского научного центра ДВО РАН, 2002. 4 с.

Уломов В.И. Оценка сейсмической опасности и актуализация инженерных решений. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2008. № 3. С. 16–21.

Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб 1: 8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.

Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. Разломы Сахалина. Тихоокеанская геология, 1984. № 2. С. 77–86.

Шевырев С.Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab. Успехи современного естествознания, 2018. № 10. С. 138–143.

Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. Pattern Recognition, 1981. V. 13. No. 2. P. 111–122.

Canny J.F. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986. V. 8. P. 679–698.

Hiromichi F., Man D.C., Phan A. Digital Earth: A platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables. Big Earth Data, 2021. V. 5. No. 4. P. 476–496. DOI: 10.1080/20964471.2021.1948677.

Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Identification of disjunctive dislocations as one of the parameters for estimating a territory seismicity of North Sakhalin. 4th GeoProNH. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. V. 946. Id. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/946/1/012003.

Mercante E., Antunes J.F.G. Simulation of a gas pipeline pathway integrating remote sensing data and geographic information systems. Acta Scientiarum. Technology, 2010. V. 32. No. 2. P. 171–178.

Xue L.-Y., Pan J.-J. Edge detection combining wavelet transform and Canny operator based on fusion rules. IEEE. 2009 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2009. P. 324–328. DOI: 10.1109/ICWAPR.2009.5207422.

REFERENCES

Akovetskiy V.G., Afanasiev A.V., Ilchenko A.A. Aerospace monitoring in the problems for assessment of geoeological risks for accidental spills of oil and petroleum products. Computational technologies, 2021. V. 26. No. 1. P. 72–85 (in Russian). DOI: 10.25743/ICT.2021.26.1.006.

- Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G.* Database of active faults of Eurasia. *Geodynamics and tectonophysics*, 2017. V. 8. No. 4. P. 711–736 (in Russian).
- Ballard D.H.* Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition*, 1981. V. 13. No. 2. P. 111–122.
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A.* Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2015. V. 12. No. 5. P. 203–221 (in Russian).
- Bondur V.G., Zverev A.T.* A Method of Earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2005. No 3. P. 37–52 (in Russian).
- Bratkov V.V., Vorobyov V.A., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A.* Mapping the dynamics of plant communities in the northern part of the boreal forests of Sakhalin Island based on remote sensing data. *Monitoring. Science and technology*, 2020. No. 3 (45). P. 6–13 (in Russian). DOI: 10.25714/MNT.2020.45.001.
- Canny J.F.* A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986. V. 8. P. 679–698.
- Dolgopолоv D.V., Melkiy V.A., Baborykin M.Yu.* The use of earth remote sensing technologies to provide geotechnical monitoring and mapping in pipeline transport. *Regional Geosystems*, 2022. V. 46 (3). P. 339–355 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355.
- Hiromichi F., Man D.C., Phan A.* Digital Earth: A platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables. *Big Earth Data*, 2021. V. 5. No. 4. P. 476–496. DOI: 10.1080/20964471.2021.1948677.
- Karpik A.P.* Methodological and technological bases of geoinformation support of territories: monograph. Novosibirsk: Siberian State Geodesy Academy (SSGA), 2004. 259 p.
- Kharakhinov V.V., Galtsev-Bezyuk S.D., Tereshchenkov A.A.* Faults of Sakhalin. *Pacific Geology*, 1984. No. 2. P. 77–86 (in Russian).
- Kravtsova V.I.* The possibilities of comparing for multitemporal imagery of various resolution under the northern river deltas dynamics investigation. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography*, 2021. V. 27. Part 1. P. 277–291 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-277-291.
- Kudrina M.A.* Using Hough transformation for detecting lines and circles in pictures. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014. V. 16. No. 4 (2). P. 476–478 (in Russian).
- Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A.* Identification of disjunctive dislocations as one of the parameters for estimating a territory seismicity of North Sakhalin. *4th GeoProNH. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. V. 946. Id. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/946/1/012003.
- Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A., Melkiy V.A.* Mapping of faults on territory of the North Sakhalin plain by remote sensing data. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography*, 2021. V. 27. Part 1. P. 317–329 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-317-329.
- Lomtev V.L., Zherdeva O.A.* To seismotectonic Sakhalin: new approaches. *Geology and useful minerals of the World Ocean*, 2015. No. 3. P. 56–68 (in Russian).
- Malinnikov V.A., Altynov A.E., Popov S.M., Stetsenko A.F.* Monitoring of the natural environment by aerospace means. Moscow: MIIGAiK, 2009. 140 p. (in Russian).

Melkiy V.A., Tikunova I.N., Eryomchenko E.N., Chereshnia O.Y., Hiromichi F., Sukendra M., Tahjana J. GIS decision-making support for the use of energy resources of Sakhalin. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2017. V. 23. Part 3. P. 132–143 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-132-143.

Mercante E., Antunes J.F.G. Simulation of a gas pipeline pathway integrating remote sensing data and geographic information systems. Acta Scientiarum. Technology, 2010. V. 32. No. 2. P. 171–178.

Romanyuk V.A., Pishchal'nik V.M., Zarubina D.V. Analysis of the ice cover variations in the arctic sea of Okhotsk based on aircraft and satellite observations InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 441–449 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-441-449.

Rozhdestvensky V.S. The role of shifts in the formation of the structure of Sakhalin Island. Geotectonics, 1982. No. 4. P. 99–111 (in Russian).

Savinykh V.P., Malinnikov V.A., Uchaev D.V., Uchaev Dm.V. Automated technology of decoding and analysis of linear and ring structures in satellite images. Izvestia vuzov “Geodesy and Aerophotosurveying”, 2012. No. 6. P. 53–65 (in Russian).

Sergeev K.F. On the tectonic nature of the uplift of the Western Sakhalin Mountains. Pacific geology, 1982. No. 1. P. 75–83 (in Russian).

Shevyrev S.L. LEFA software: an automatized structural analysis of remote sensing imagery in MATLAB environment. Advances in current natural sciences, 2018. No. 10. P. 138–143 (in Russian).

Streltsov M.I., Kozhurin A.I. Active faults and strong earthquakes in Sakhalin Isl. (Aprelovka active fault, results of trenching). Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Marine Geology & Geophysics FEB RAS, 2002. 4 p. (in Russian).

Ulomov V.I. Seismic hazard assessment and updating of engineering solutions. Earthquake engineering. Constructions safety, 2008. No. 3. P. 16–21 (in Russian).

Ulomov V.I., Shumilina L.S. A set of maps of the general seismic zoning of the territory of the Russian Federation — OSR-97. Scale 1: 8 000 000. Explanatory note and list of cities and settlements located in earthquake-prone areas. Moscow: UIFE RAS, 1999. 57 p. (in Russian).

Veselov O.V., Gretskaya E.V., Ilyev A.Ya., Kononov V.E., Kochergin E.V., Patrikeev V.N., Semakin V.P., Senachin V.N., Ageev V.N., Vasyuk I.B., Volgin P.F., Zlobina L.M., Zhigulev V.V., Kornev O.S., Kochergin A.V., Kudelkin V.V. Tectonic zoning and hydrocarbon potential of the Sea of Okhotsk. Moscow: Nauka, 2006. 130 p. (in Russian).

Voeikova O.A., Nesmeyanov S.A., Serebryakova L.I. Neotectonics and active breaks of Sakhalin. Moscow: Nauka, 2007. 185 p. (in Russian).

Xue L., Pan J. Edge detection combining wavelet transform and Canny operator based on fusion rules. IEEE. 2009 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, IEEE, 2009. P. 324–328. DOI: 10.1109/ICWAPR.2009.5207422.

Zverev A.T., Malinnikov V.A., Arellano-Baesa A. Studying dynamics of lineaments caused by earthquakes in South America, using the lineament analysis of ASTER (TERRA) satellite data. Izvestia vuzov “Geodesy and aerophotosurveying”, 2005. No. 5. P. 56–65 (in Russian).