

УДК 528.77:551.24(571.642)

DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-1-52-60

## ДЕШИФРИРОВАНИЕ РАЗЛОМОВ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ОСТРОВА САХАЛИН

*Олеся Витальевна Купцова*

Сахалинский государственный университет, 693023, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 2, помощник руководителя, тел. (924)190-00-08, e-mail: Korsuncevaolesy@gmail.com

Разломам Сахалина, как правило, сопутствует высокая сейсмичность, что необходимо учитывать при дешифрировании данной территории. Определенные факторы, сопровождающие землетрясения, обеспечивают дешифровочные признаки, позволяющие более точно определять линейные элементы, сопутствующие разломам. С помощью автоматического линейного анализа не сложно выделить разломные зоны с использованием математических алгоритмов, употребляющихся в компьютерном зрении. Цель исследования состоит в том, чтобы показать зависимость расположения разломных зон и эпицентров землетрясений посредством анализа серии модифицированных космических снимков и геофизических данных. Технология дешифрирования разломов включает в себя следующие методы: 1) методы предварительной обработки снимков, обеспечивающие работу на платформе ArcGIS; 2) методы определения линейных элементов, позволяющие провести обработку серии снимков в программе PyLEFA; 3) методы проектирования карт путем анализа полученных линейных элементов и геофизических данных исследуемой территории на платформе QGIS. В этой статье рассматривается территория юго-западной части острова Сахалин по изображениям, полученным с помощью спутника Landsat-8 и данным SRTM. Анализ дизъюнктивных нарушений проводился с помощью программных продуктов PyLEFA, QGIS и ArcGIS. В результате проведенных исследований выявлена зависимость, показывающая увеличение количества землетрясений вблизи разломов земной коры.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, дешифрирование, анализ линейных элементов, геоинформационное тематическое картографирование, геодинамическая активность, PyLEFA, SRTM, Landsat

### *Введение*

При мониторинге сейсмоопасных территорий необходимо учитывать зоны разрывных нарушений, так как они характеризуются определенным механизмом формирования линейных элементов, регистрируемых на спутниковых снимках [1, 2]. Землетрясения происходят в результате разрядки накопившихся напряжений между блоками земной коры, которые разделяет сеть дизъюнктивных нарушений [3–6]. Чем глубже разлом определяется в земной коре, тем больше опережающих его трещин регистрируется при дешифрировании космических снимков. Трещины обусловлены не только геодинамической активностью, но и приуроченными к ним зонами дезинтеграции, милонитизации, расланцевания, катаклаза, брекчирования, дробления. Горные породы данных зон обычно характеризуются хорошим коэффициентом проницаемости, пори-

стостью и фильтрацией. Соответственно растительность, произрастающая в исследуемых зонах, подчеркивает линейные элементы, дешифрируемые на изображениях, так как отличается от основной произрастающей растительности [7–9].

### *Материалы и методы исследования*

Материалами для дешифрирования исследуемой территории являлись данные космических изображений аппарата Shuttle и Landsat-8 [10–12]. Данные были подвергнуты всем необходимым видам коррекции, таким как геометрическая, радиометрическая, атмосферная и др. Первый уровень обработки соответствует материалам, полученным с сайта геологической службы США. Использовались 16-битные одноканальные изображения спутника Landsat 8 формата GeoTIFF. На сайте изображения корректируются, геолокируются и калибруются. Мате-

риалы аппарата Shuttle представляют из себя изображения, полученные при помощи радарной интерферометрической съемки SRTM, которые прошли процедуру фильтрации ошибочных значений.

Первичная обработка снимков определялась исходными данными, необходимыми для анализа в программе LEFA. Быстрее всего анализируются изображения, не превышающие размера 100 пикселей. Формат материалов, загружаемых в программу, должен быть с разрешением \*.tif и иметь географическую привязку. Таким образом, в программе ArcGIS была проведена обработка исследуемых материалов. Было получено различное разрешение космических изображений и выполнена обрезка для соответствия снимка исследуемой территории и ее детального анализа. Помимо разрешения 30 м, соответствующих снимкам Landsat 8, изображения обрабатывались в программе ArcGIS [13] для получения материалов с разрешением 60, 90, 120, 180 м, необходимых для дальнейшего анализа территории. Материалы SRTM позволили выявить формы рельефа, указывающие на зоны разрывных нарушений. Они также были подвергнуты дальнейшей обработке в программном комплексе LEFA [14], в котором происходил автоматический линеаментный анализ. Существует множество методов линеаментного анализа [15–17]. Результаты, описываемые в статье, были получены с помощью математических методов Кэнни [18] и морфологической эрозии [19, 20]. Алгоритм морфологической эрозии работает по принципу удаления «лишнего» при сопоставлении изображения с эталоном, благодаря чему у исходных изображений определяются их границы [21]. Границы изображения, определяемые по методу Кэнни, улавливаются благодаря используемой в методе матрице. Точные границы изображения определяются после использования метода двойного порога и метода истончения.

Каждый снимок различного разрешения был обработан при разной чувствительности линий: small, medium и mapu. Чем больше чувствительность, тем большее количество линеаментов выделяется на снимке. Коллинеарные линии были выделены с помощью ал-

горитма Хафа [22, 23], который использует линейные вероятностные параметры известных величин уравнения  $y = kx + b$ . Определяя, какие линии по теории вероятности являются продолжением друг друга, программа строит соединенные коллинеарные линии.

Дальнейшее комплексирование модифицированных изображений и геофизических данных проводилось в геоинформационной системе QGIS [24]. Модифицированные снимки были наложены друг на друга, в результате чего, по наибольшему совпадению линий, учету цифровой модели рельефа и сейсмологии, были проведены разрывные нарушения на карте.

Методики различных этапов обработки материалов для выявления разрывных нарушений позволили составить технологическую схему дешифрирования разломов (рис. 1). Технология включает в себя семь этапов.

1. Поиск и выгрузка исходных материалов, подходящих под цели научного исследования.
2. Предварительная обработка материалов.
3. Определение границ изображения с помощью методов Canny и Erosion.
4. Определение штрихов-линий с помощью автоматического анализа изображения в программе PyLEFA.
5. Определение коллинеарных линий, указывающих на вероятность местонахождения разлома с помощью метода Хафа.
6. Проектирование карты, включающее в себя анализ линеаментов и геофизических данных в программе QGIS.
7. Построение карты и ее печать.

Результатом разработанной технологии с использованием сейсмических и данных дистанционного зондирования, является карта дизъюнктивных нарушений исследуемой территории.

### **Результаты и обсуждение**

При обработке материалов исследуемой территории юго-западной части острова Сахалин были выявлены зоны разрывных нарушений, характеризующиеся повышенным количеством трещин (рис. 2).

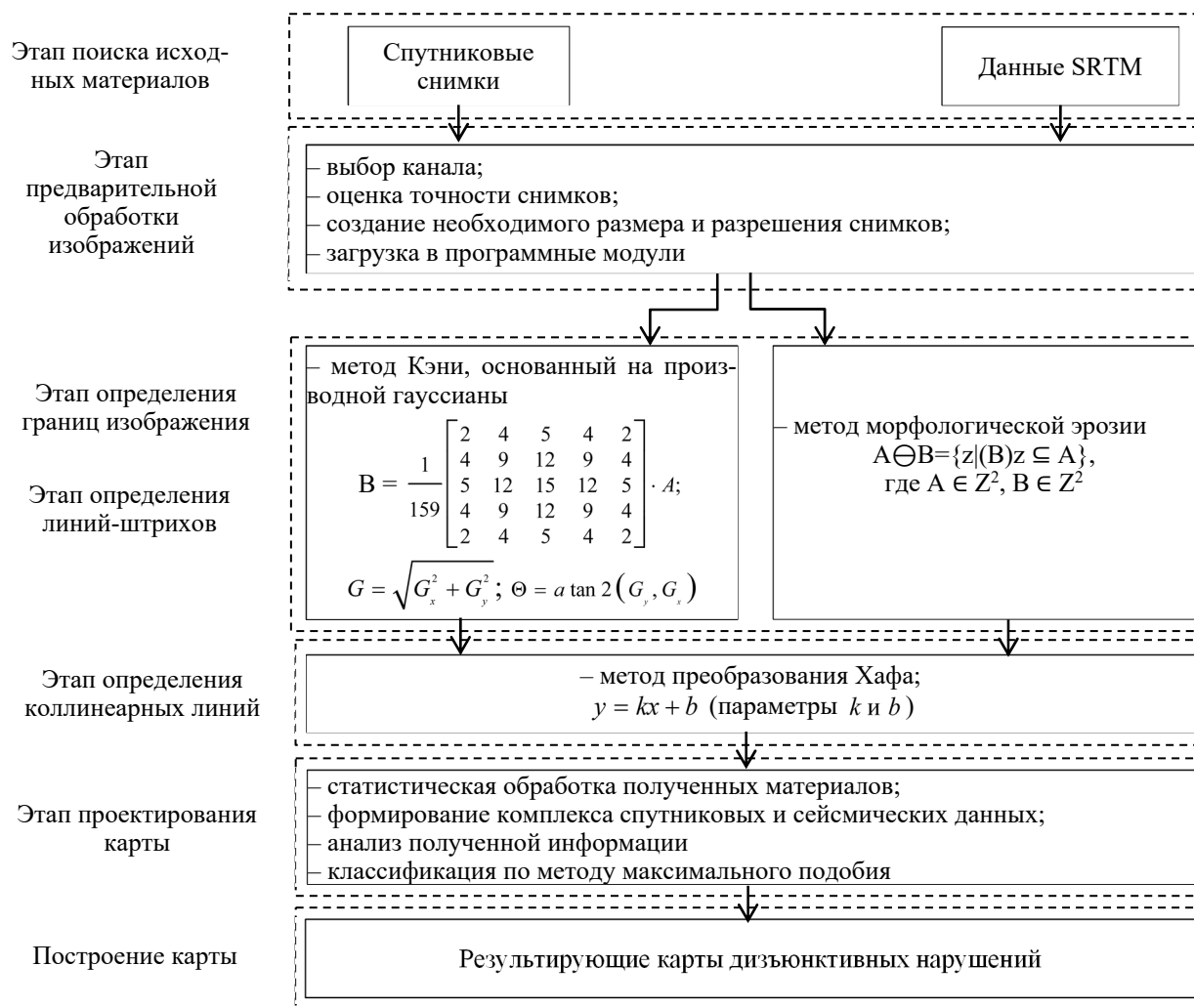


Рис. 1. Технологическая схема дешифрирования разломных зон

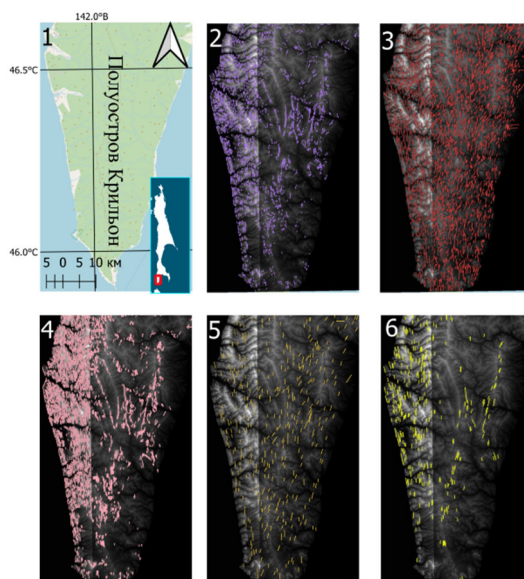


Рис. 2. Изображения с линеаментами, выделенными в программе LEFA при использовании различных методов:

1 – карта полуострова Крыльон; 2 – Canny many; 3 – Erosion medium; 4 – Canny medium; 5 – Erosion small; 6 – Canny small

Материалы линеamentного анализа, полученные после обработки исходных изображений, показывают линейно-полосчатые текстуры, характеризующие деформационно-напряженное состояние земной коры. Это обусловлено хорошей проницаемостью пород в зонах разломов. Полученные материалы говорят о высокой мобильности земной коры. Регистрируемые линеamentы обусловлены изменением деформационно-напряженного состояния земной коры. Интегральный эффект снимков и сейсмических данных позволяет путем анализа выявить предполагаемые разломные структуры. Землетрясения располагаются главным образом вблизи разломов. На рис. 2 представлено площадное распределение линеamentов, выделенных с помощью метода морфологической эрозии, и локальное распределение, выделенное при помощи метода Кэни. Модифицированные изображения с выбранной высокой чувствительностью (mapu) дают более развернутую информацию о земной поверхности. Средняя чувствительность линий (medium) обращает наше внимание на некоторые участки анализируемой территории. Малая чувствительность линий выделяет наиболее выражен-

ные на поверхности линеamentы, соответствующие долгоиграющим разрывным нарушениям. Обработанные снимки и данные SRTM в формате shape-файлов анализируются в программном модуле Quantum GIS.

Результирующие материалы, полученные в результате обработки информации о местоположении землетрясений и дизъюнктивных нарушений, позволяют судить о характере взаимоотношенности сейсмической активности и трещиноватости массивов горных пород в разломных зонах (рис. 3). Сейсмическая активность в зоне разломов создает структурные прочностные неоднородности в горных породах, его слагающих. При выделении линеamentов с помощью автоматизированного дешифрирования минимизируется личностная составляющая дешифратора, его субъективность. Программные продукты позволяют увидеть и отобразить то, что человеческий глаз мог пропустить и не заметить. После выделения линеamentов программой наступает время анализа и построения карты в QGIS, где, интегрируя все полученные данные, выделяются определенные линии, формирующие региональные и локальные структурные закономерности земной коры.

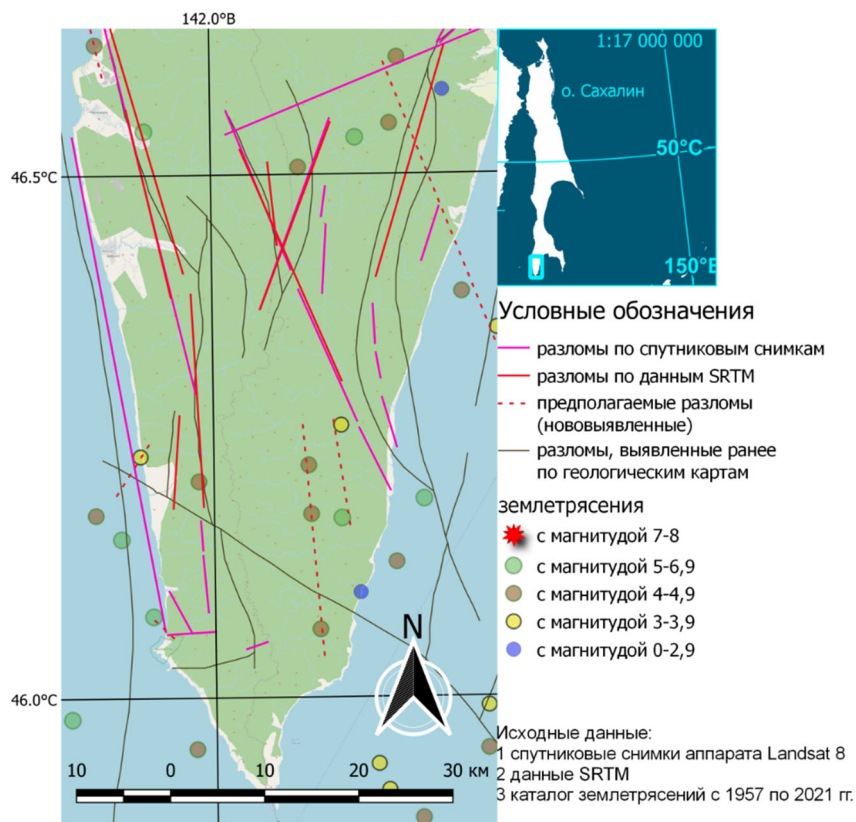


Рис. 3. Результирующая карта взаимообусловленности активных разломных зон и землетрясений

На полученной карте можно отметить четкую приуроченность землетрясений к зонам разрывных нарушений. Области, на которых отмечены землетрясения, характеризуются повышенным напряжением земной коры, о чем говорят многочисленные трещины в зонах разломов. Западная часть полуострова Крильон характеризуется сейсмической активностью, приуроченной к зоне Западно-Сахалинского

литосферного разлома, выделяемого ранее многочисленными исследователями [25, 26]. Центральная и восточная часть полуострова Крильон отражает зону повышенной трещиноватости Центрально-Сахалинского разлома.

Анализ полученных результатов показал, что около 90 % землетрясений приурочены к зонам разломов и находятся на расстоянии от 0 до 3 км от них (таблица).

Разломы исследуемой территории о. Сахалин, выделенные в различных режимах программы LEFA

Название разлома	Процент землетрясений острова Сахалин, приуроченных к разломам, с магнитудой больше 3 за период 1900–2021 гг.	Близость разломов от эпицентров землетрясений выше трех баллов	Доля от землетрясений, лежащих вблизи разлома
Западно-Сахалинский	15,3 %	0–1 км	70 %
		1–2 км	19 %
		2–3 км	9 %
		6–7 км	1 %
		16–17 км	1 %
Центрально-Сахалинский	22 %	0–1 км	66 %
		1–2 км	26 %
		2–3 км	4 %
		3–4 км	4 %

Подвижки в зонах разлома могут привести к потерям, как материальным, так и человеческим жертвам. Поэтому зоны разрывных нарушений не должны рассматриваться в качестве территории под строительство важных объектов народно-хозяйственного назначения,

чтобы минимизировать связанные с ними риски. Для предотвращения ситуаций, подобных той, что произошла с поселком Нефтегорск, необходимо более тщательное исследование зон вблизи разломов, и их разносторонний анализ [27–29].

### Заключение

Полученные результаты заслуживают особого внимания, так как помимо ранее известных разломных зон были выделены новые области дизъюнктивных нарушений. Необходимо более тщательное исследование данной территории, использующее крупномасштабные снимки, а также ряд геофизических наблюдений. Материалы исследования позволяют предложить принципиально новый подход к изучению несогласий земной коры, основанный на космическом мониторинге территории исследования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондур В. Г., Зверев А. Т., Гапонова Е. В., Зима А. Л. Исследование из космоса предвестниковой цикличности при подготовке землетрясений, проявляющейся в динамике линеаментных систем // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 1. – С. 3–30.
2. Бондур В. Г., Зверев А. Т. Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 1. – С. 47–56.



3. Аглонов С. А. Геодинамика. – СПб. : СПбГУ, 2001. – 360 с.
4. Короновский Н. В. Общая геология : учеб. – 2-е изд., стереотип. – М. : ИНФРА-М, 2017. – 474 с.
5. Зверев А. Т. Инженерная геодинамика : учеб. для студентов высших учебных заведений. – М. : МИИГАиК, 2013. – 324 с.
6. Парначёв В. П. Основы геодинамического анализа : учеб. пособие. – Томск : НТЛ, 2011. – 308 с.
7. Трифионов В. Г. Особенности развития активных разломов // Геотектоника. – 1985. – № 2. – С. 16–26.
8. Трифионов В. Г. Живые разломы земной коры // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 7. – С. 66–74.
9. Жмакин Е. Я., Давыдова Е. Г. Разломы земной коры и особенности растительности в зоне их влияния на территории Калужской области // Вестник Калужского университета. – 2010. – № 3. – С. 57–60.
10. USGS EROS Archive. Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://glovis.usgs.gov/aP> (accessed 15.06.2021).
11. United States Geological Survey (USGS) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://doi.org/earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 15.06.2021)
12. Sentinel Missions. Website ESA (European Space Agency) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (accessed 15.06.2021).
13. Ресурсы для ArcMap // ESRI.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-desktop/resources> (дата обращения: 15.06.2021).
14. Шевырёв С. Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 138–143.
15. Купцова О. В. Методика выявления дизъюнктивных нарушений по данным дистанционного зондирования Земли с использованием линеamentного анализа [Электронный ресурс] // Мониторинг. Наука и Технологии. – 2021. – № 1 (47). – С. 84–91. – Режим доступа: <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.47.001> ISSN 2076-7358.
16. Зверев А. В., Зверев А. Т. Применение автоматизированного линеamentного анализа космических снимков при поисках нефтегазовых месторождений, прогнозе землетрясений, склоновых процессов и путей миграции подземной воды // Изв. вузов. Геология и разведка. – 2015. – № 6. – С. 14–20.
17. Купцова О. В., Верхотуров А. А., Мелкий В. А. Картографирование разломов на территории Северо-Сахалинской равнины по данным дистанционного зондирования Земли // ИнтерКарто. ИнтерГИС 27. Междунар. науч. конф. «Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий» : сб. материалов. – М. : Географ. факультет МГУ, 2021. –Т. 27, ч. 1. – С. 317–329.
18. Canny J. F. A Computational Approach to Edge Detection [Electronic resource] // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986. – Vol. pami-8, No. 6. –P. 679–698. – Mode of access: <http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERSACS/canny1986.pdf> (accessed: 15.06.2021).
19. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.
20. Кашницкий А. В., Балашов И. В., Лупян Е. А., Толпин В. А., Уваров И. А. Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 1. – С. 156–170.
21. Galamhos C., Matas J., Kittler J. Progressive probabilistic Hough transform for line detection [Electronic resource] // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 1999. – P. 554–560. – Mode of access: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/9451/1999-Progressive-probabilistic-Hough-Transform-for-line-detection.pdf?sequence=1> (accessed 15.06.2021)
22. Hobbs W. H. Lineaments of the Atlantic border region // Bulletin of the Geological Society of America. – 1904. – Vol. 15. – P. 483–506.
23. Shahtahmasebi A., Yang N., Wang K., Moore N., Shen Z. Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing // Chinese Geographical Science. – 2013. – Vol. 23 (4). – P. 403–420. doi: <https://doi.org/10.1007/s11769-013-0613-x>.
24. The QGIS Line Direction Histogram Plugin. Håvard Tveite. Created using Sphinx 1.6.7. [Electronic resource]. – Mode of access : <http://plugins.qgis.org/plugins/LineDirectionHistogram/> (accessed 15.06.2021).
25. Харахинов В. В., Гальцев-Безюк С. Д., Терещенков А. А. Разломы Сахалина // Тихоокеан. Геология. – 1984. – № 2. – С. 77–86.

26. Ломтев В. Л., Жердева О. А. К сейсмотектонике Сахалина: новые подходы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2015. – № 3. – С. 56–68.

27. Долгополов Д. В. Использование данных дистанционного зондирования Земли при формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 151–159. doi: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-3-151-159>.

28. Долгополов Д. В., Никонов Д. В., Полуянова А. В., Мелкий В. А. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 65–81.

29. Карпик А. П., Середович В. А., Дубровский А. В., Ким Э. Л., Малыгина О. И. Анализ природных и техногенных особенностей геопространства чрезвычайной ситуации // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГА, 2012. Т. 3. – С. 178–184.

Получено 01.12.2021

© О. В. Купцова, 2022

## DECODING OF FAULTS IN THE SOUTHWESTERN PART OF SAKHALIN ISLAND

*Olesya V. Kuptsova*

Sakhalin State University, 2, Pogranichnaya St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia, Senior Lecturer, phone: (924)190-00-08, e-mail: [Korsuncevaolesy@gmail.com](mailto:Korsuncevaolesy@gmail.com)

Sakhalin faults, as a rule, are accompanied by high seismicity, which must be taken into account when deciphering this territory. Certain factors accompanying earthquakes provide decoding features that allow more accurately determining the lineaments accompanying faults. With the help of automatic lineament analysis, it is not difficult to identify fault zones using mathematical algorithms used in computer vision. The purpose of the study is to show the dependence of the fault zones location and earthquake epicenters by analyzing a series of modified images of satellite surveys and geophysical data. The technology of fault decoding includes the following methods: 1) methods of preliminary processing of images that ensure operation on the ArcGIS platform; 2) methods for determining lineaments that allow processing a series of images in the PyLEFA program; 3) methods for designing maps by analyzing the obtained lineaments and geophysical data of the studied territory on the QGIS platform. Results. This article examines the territory of the southwestern part of Sakhalin Island based on images obtained using the Landsat-8 satellite and SRTM data. The analysis of disjunctive disorders was carried out using the software products PyLEFA, QGIS and ArcGIS. As a result of the conducted studies, a dependence was revealed showing an increase in the number of earthquakes near the faults of the Earth's crust.

**Keywords:** remote sensing of the Earth, decoding, lineament analysis, geographic information thematic mapping, geodynamic activity, PyLEFA, SRTM, Landsat

## REFERENCES

1. Bondur, V. G., Zverev, A. T., Gaponova, E. V., & Winter, A. L. (2012). Investigation from space of the precursor cyclicity in the preparation of earthquakes, manifested in the dynamics of lineament systems. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Investigation of the Earth from Space]*, 1, 3–30 [in Russian].
2. Bondur, V. G., & Zverev, A. T. (2007). Mechanisms of formation of lineaments recorded on satellite images when monitoring earthquake-prone territories. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Investigation of the Earth from Space]*, 1, 47–56 [in Russian].
3. Aplonov, S. A. (2001). *Geodinamika [Geodynamics]*. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publ., 360 p. [in Russian].
4. Koronovsky, N. V. (2017). *Obshchaya geologiya [General geology]* (2nd ed., stereotype). Moscow: INFRA-M Publ., 474 p. [in Russian].

5. Zverev, A. T. (2013). *Inzhenernaya geodinamika [Engineering geodynamics]*. Moscow: MIIGAiK Publ., 324 p. [in Russian].
6. Parnachev, V. P. (2011). *Osnovy geodinamicheskogo analiza [Fundamentals of geodynamic analysis]*. Tomsk: NTL Publ., 308 p. [in Russian].
7. Trifonov, V. G. (1985). Features of the development of active faults. *Geotektonika [Geotectonics]*, 19(2), 16–26 [in Russian].
8. Trifonov, V. G. (2001). Living faults of the Earth's crust. *Sorosovskiy obrazovatelny zhurnal [Soros Educational Magazine]*, 7(7), 66–74 [in Russian].
9. Zhmakin, E. Ya., & Davydova, E. G. (2010). Faults of Earth's crust and vegetation features in zone of their influence on territory of the Kaluga region. *Vestnik Kaluzhskogo universiteta [Bulletin of the Kaluga University]*, 3, 57–60 [in Russian].
10. USGS EROS Archive. Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. GloVis Website USGS (U. S. Geological Survey). Retrieved from <https://glovis.usgs.gov/aP> (accessed 15.06.2021)
11. United States Geological Survey (USGS). Retrieved from <https://doi.org/earthexplorer.usgs.gov/> (accessed June 15, 2021)
12. Sentinel Missions. Website ESA (European Space Agency). Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (accessed June 15, 2021).
13. Resources for ArcMap. ESRI.com. Retrieved from <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources> (accessed June 15, 2021).
14. Shiverov, S. L. (2018). LEFA software: an automatized structural analysis of remote sensing imagery in MATLAB environment. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Advances in Current Natural Sciences]*, 10, 138–143 [in Russian].
15. Kuptsova, O. V. (2021). Methodology for detecting disjunctive disorders based on remote sensing data using lineament analysis. *Monitoring. Nauka i Tekhnologii [Monitoring. Science and Technology]*, 1(47), 84–91. Retrieved from <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.47.001> ISSN 2076-7358 [in Russian].
16. Zverev, A. V., & Zverev A. T. (2015). Application of automated lineament analysis of satellite images in the search for oil and gas fields, prediction of earthquakes, slope processes and ways of underground water migration. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka [Izvestia of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration]*, 6, 14–20 [in Russian].
17. Kuptsova, O. V., Verkhoturov, A. A., & Melky, V. A. (2021). Mapping of faults on the territory of the North Sakhalin Plain according to remote sensing of the Earth. In *InterKarto. InterGIS 27. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya: T. 1. Geoinformatsionnaya podderzhka ustoychivogo razvitiya territoriy [InterCarto. InterGIS 27. International Scientific Conference: Vol. 1. Geoinformation Support for Sustainable Development of Territories]* (pp. 21–30). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
18. Canny, J. F. A. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pami-8, 6, NOV679–698. Retrieved from <http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERSACS/canny1986.pdf> (accessed March 25, 2021).
19. Shovengerdt, R. A. (2010). *Distsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy [Remote sensing. Models and methods of image processing]*. Moscow: Tekhnosfera Publ., 560 p. [in Russian].
20. Kashnitskiy, A. V., Balashov, I. V., Lupyan, E. A., Tolpin, V. A., & Uvarov, I. A. (2015). Creating tools for remote processing of satellite data in modern information systems. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]*, 12(1), 156–170 [in Russian].
21. Galamhos, C., Matas, J., & Kittler, J. (1999). Progressive probabilistic Hough transform for line detection. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 554–560). Retrieved from <https://dSPACE.CVUT.CZ/bitstream/handle/10467/9451/1999-Progressive-probabilistic-Hough-Transform-for-line-detection.pdf?sequence=1> (accessed June 15, 2021).
22. Hobbs, W. H. (1904). Lineaments of the Atlantic border region. *Bulletin of the Geological Society of America*, 15, 483–506.
23. Shahtahmassebi, A., Yang, N., Wang, K., Moore, N., & Zhangquan, Sh. (2013). Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing. *Chinese Geographical Science*, 23(4), 403–420. doi: <https://doi.org/10.1007/s11769-013-0613-x>.



24. The QGIS Line Direction Histogram Plugin. Håvard Tveite. Created using Sphinx 1.6.7. Retrieved from <http://plugins.qgis.org/plugins/LineDirectionHistogram/> (accessed June 15, 2021).

25. Kharakhinov, V. V., Galtsev-Bezyuk S. D., & Tereshchenkov A. A. (1984). Faults of Sakhalin. *Tikhookean. Geologiya [Pacific. Geology]*, 2, 77–86 [in Russian].

26. Lomtev, V. L., & Zherdeva, O. A. (2015). To the seismotectonics of Sakhalin: new approaches. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana [Geology and Minerals of the World Ocean]*, 3, 56–68 [in Russian].

27. Dolgopolov, D. V. (2020). Use of earth remote sensing data for formation of geodata space of pipeline transport. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(3), 151–159. doi: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-3-151-159> [in Russian].

28. Dolgopolov, D. V. Nikonov, D. V., Poluyanova, A. V., & Melkiy, V. A. (2019). Possibilities of visual interpretation of trunk pipelines and infrastructure facilities using satellite images of high and ultra-high spatial resolution. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(3), 65–81. doi: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81 [in Russian].

29. Karpik, A. P., Seredovich, V. A., Dubrovskij, A. V., Kim, E. L., & Malygina, O. I. (2012). Analysis of natural and man-made features of the emergency geospace. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia 2012: International Scientific Conference: Vol. 3. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 178–184). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

Received 10.10.2021

© O. V. Kuptsova, 2022