

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ЗОН ДИЗЪЮНКТИВНЫХ ДИСЛОКАЦИЙ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОГО САХАЛИНА ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК**

*Олеся Витальевна Купцова*

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

*Алексей Александрович Верхотуров*

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (914)760-68-87, e-mail: ussr-91@mail.ru

*Вячеслав Анатольевич Мелкий*

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (984)139-70-77, e-mail: vamelkiy@mail.ru

В статье приводятся результаты исследования дизъюнктивных нарушений земной коры в северной части острова Сахалин посредством анализа полей линеаментов, которые выявлены на основе материалов космических съемок с помощью программного комплекса LEFA. Объект исследования выбран не случайно: восточная часть территории севера Сахалина достаточно хорошо изучена геолого-геофизическими методами с целью выделения нефтегазоносных структур, а также в связи с пристальным вниманием к ней после катастрофического Нефтегорского землетрясения 28 мая 1995 г. Результат работы предшественников позволил произвести проверку достоверности полученных результатов и оценить перспективность использования технологий автоматизированного дешифрирования для выявления сейсмоактивных зон. Целью работы являлось создание карт активных разломных зон исследуемой территории. В процессе работы проведён анализ данных SRTM и космических снимков Landsat-8 за 2015-2020 гг., полученных в восьми спектральных каналах, с помощью алгоритмов выявления местоположения линеаментов, основанных на методах математической обработки снимков с использованием разных алгоритмов. Выявлено, что наиболее информативными для выделения дизъюнктивных нарушений являются изображения, полученные в красной, инфракрасной зонах электромагнитного спектра (4, 5, 6, 7), и панхроматическом канале (8). На основе полученных данных составлены карты дизъюнктивных дислокаций острова Сахалин масштаба 1: 500 000. Статья обладает определенной новизной в связи с тем, что технологические приемы LEFA впервые применены для изучения сложных в геологическом плане структур Северного Сахалина. Основные результаты работы будут полезны при выборе мест для строительства объектов хозяйственного и промышленного назначения, а также при разведке, поиске и эксплуатации месторождений полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** космические снимки, технология автоматизированного дешифрирования, линеаментный анализ, программный пакет LEFA, дизъюнктивные нарушения, Сахалин

## **DETECTION ZONES OF DISJUNCTIVE DISLOCATIONS FOR THE TERRITORY OF NORTHERN SAKHALIN BY DATA OF SPACE SURVEYS**

*Olesya V. Kuptsova*

Sakhalin State University, 2 Pogrannichnaya str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia, Ph. D. Student, phone: (924)190-00-08, e-mail: Korsuncevaolesy@gmail.com

***Alexey A. Verkhoturov***

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, 1B, Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (914)760-68-87, e-mail: ussr-91@mail.ru

***Vyacheslav A. Melkiy***

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, 1B, Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (984)139-70-77, e-mail: vamelkiy@mail.ru

The article presents results of the research of disjunctive dislocations of the earth's crust in northern part of the Sakhalin Island by analyzing the fields of lineaments, which identified on basis of satellite surveys using the LEFA software package. The object of research was chosen not by chance: eastern part of territory of the north of Sakhalin Island is quite well studied by geological and geophysical methods in order to identify oil and gas-bearing structures, as well as in connection with the close attention to it after catastrophic Neftegorsk earthquake on May 28, 1995. The result of work of the predecessors made it possible for verify the reliability of results obtained and assess of prospects to using automated decryption technologies to identify seismically active zones. The purpose of work was to create maps of active fault zones on studied territory. In process of the work, the SRTM data and Landsat-8 satellite images for 2015-2020, obtained in eight spectral channels, were analyzed using algorithms for detecting the location of lineaments based on methods of mathematical processing of images using different algorithms. It was revealed that images obtained in the red, infrared zones of the electromagnetic spectrum (4, 5, 6, 7), and the panchromatic channel (8) are most informative for identifying disjunctive disorders. Based on the data obtained, maps of disjunctive disorders of Sakhalin Island on scale of 1: 500,000 compiled. The article has certain novelty due to fact that the LEFA technological techniques were first used for research the geologically complex structures of Northern Sakhalin. The main results of the work will be useful in choosing places for construction of economic and industrial facilities, as well as in the exploration, search and operation of mineral deposits.

**Keywords:** satellite images, automated decoding technology, lineament analysis, LEFA software package, disjunctive dislocations, Sakhalin

### ***Введение***

Зоны разрывных нарушений всегда привлекали внимание исследователей [1–4]. Это связано не только со связью разломов и полезных ископаемых, но также и со строительством объектов на прилегающих к ним территориях. Для анализа и оценки воздействия разрывных нарушений на окружающую среду удобно использовать картографическую информацию. Карты разломов острова Сахалин строились по геологическим и геофизическим данным, однако, в основном, это были точечные данные полевых исследований [5–7]. Если и использовались при анализе материалы космических съёмки, не проводилась их оценка точности, также как и данных GPS исследований. Технология, представленная в статье, позволяет по-новому взглянуть на разломы Сахалина, учитывая точность исходных данных и выявление разломов с помощью методов автоматического линеаментного анализа. Целью исследования было построение легко читаемой карты разрывных нарушений Сахалина. Основными задачами была оценка точности исходных данных, а также выявление разломов Сахалина методами математических алгоритмов линеаментного анализа.

## Методы и материалы

В качестве исходных материалов использовались модели SRTM и космические снимки Landsat-8 [8, 9]. Для получения результатов использовались методы автоматического дешифрирования линеаментов, в частности алгоритм преобразования Хафа и алгоритм морфологического сужения (эрозии) [10–12]. Выделение линеаментов и границ изображения происходило в программе LEFA [13–16]. Суть данного метода заключается в поиске на поверхности Земли линий, указывающих на особенности геологического строения региона. Моделирование, визуализация и статистическая обработка линеаментов Сахалина проводилась с помощью программы QGIS с использованием плагина QGIS Line Direction Histogram [17].

В зависимости от выбора алгоритма распознавания линейных объектов менялась картина получаемых штрихов и их соответствие тектоническим структурам различного ранга. В качестве методов детектирования границ в программе использовались алгоритм операции бинарно-морфологической эрозии и математический алгоритм Кенни.

Эрозия является основной операцией выделения границ в математической морфологии. Объекты на изображении в математической морфологии представлены в виде множества (A) всех фоновых пикселей (точек  $z$ ). Для того, чтобы выделить необходимые параметры обрабатываемого изображения используется структурный элемент (B), то есть специальное изображение, описывающее область, с формой, необходимой для анализа. Эрозия обрабатываемого изображения (A) по структурному элементу (B) – это множество всех пикселей (точек  $z$ ), при сдвиге в которые элемент (B) полностью содержится в множестве (A).

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

где  $A \in Z^2$ ,  $B \in Z^2$ .

В результате эрозии на изображении удаляются все граничные точки, имеющие не менее одного фонового пикселя в своем окружении. Точки границ удаляются с помощью структурного элемента, который содержит все потенциальные соседние элементы. Чтобы выделить границы на изображении необходимо провести операцию разности между обрабатываемым изображением и изображением, полученным в результате эрозии.

Алгоритм обнаружения границ Кенни широко используется в системах компьютерного зрения. К изображению для его сглаживания и удаления шумов применяется алгоритм фильтрации Гаусса. Дальнейшая цифровая обработка изображения в программе PyLEFA посредством преобразований Хафа позволяет выделить линейные элементы рельефа в виде штрихов. Преобразование Хафа представляет известное уравнение прямой  $y = kx + b$  в виде параметров данной прямой, углового коэффициента  $k$  и точки пересечения с осью ординат  $b$ . Прямую можно представить в пространстве параметров в виде точки  $x$  с координатами  $k$  и  $b$ .

Результаты зависят от максимальной разницы  $k/b$  (отношение углового коэффициента уравнения сравниваемых линий к свободному члену) и максимального расстояния между центральными точками сравниваемых линий, минимального количества линий, необходимого для объединения в линеаменты.

## Результаты

В результате проведенного автоматизированного дешифрирования изображений территории Северного Сахалина были получены данные о местоположении дизъюнктивных дислокаций. В зависимости от масштаба, пространственного разрешения и уровня генерализации изображения выделены нарушения разной протяженности (трансрегиональные, региональные, субрегиональные, локальные) и рангов (1 ранг от нескольких до сотни метров, 2 ранг от сотни метров до километра, 3 ранг от 1 км до 35 км, 4 ранг от 35 до 100 км, 5 ранг более 100 км). Анализ модели SRTM и космических снимков Landsat-8 позволил выявить зоны разрывных нарушений земной коры.

Дизъюнктивные дислокации выявлены по линеаменам, выделенным с помощью методов разной чувствительности Canny, Erosion (рис. 1).

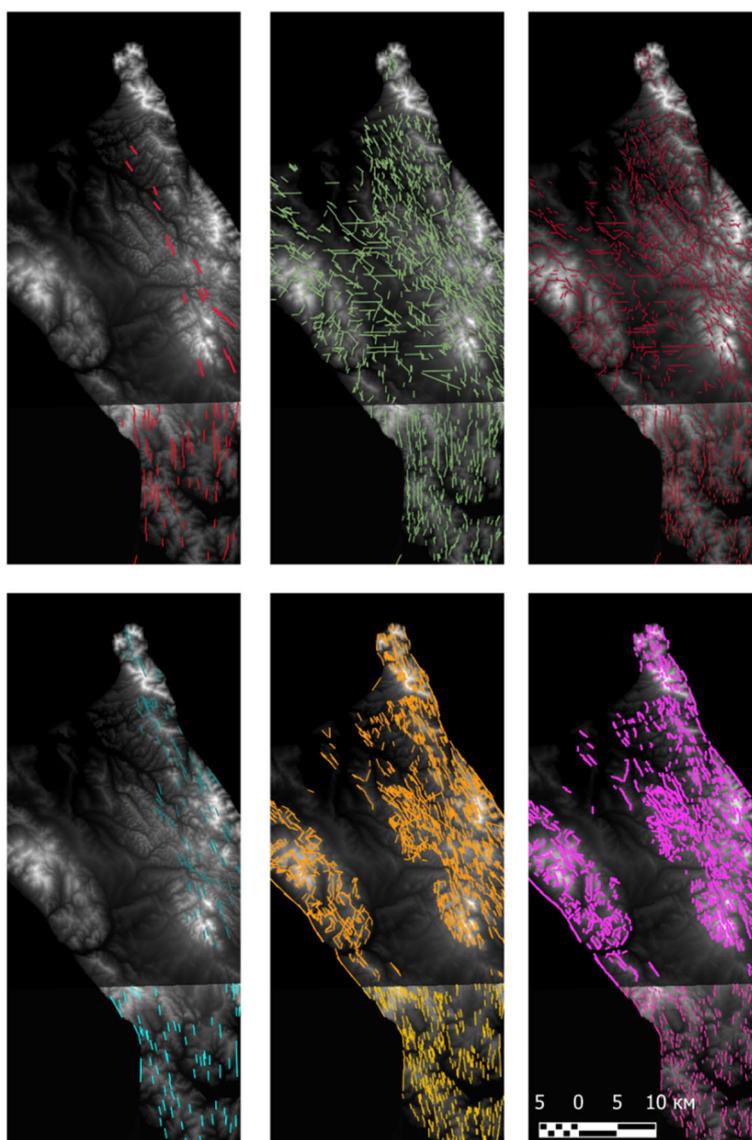
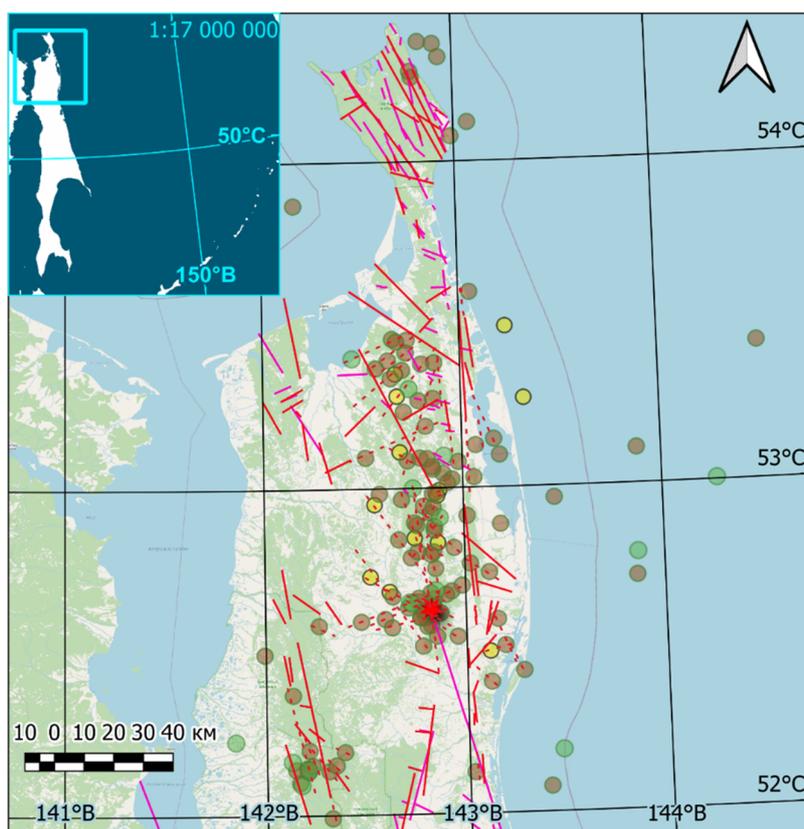


Рис. 1. Фрагменты изображения с линеаменами, выделенными в программе LEFA при использовании различных алгоритмов: 1 – Erosion small; 2 – Erosion medium; 3 – Erosion many; 4 – Canny small; 5 – Canny medium; 6 – Canny many

В итоге выявлены Западно-Сахалинский, Центрально-Сахалинский, Хоккайдо-Сахалинский (Верхне-Пильтунский сегмент), Пильтунский, Гаромайский, Вал-Лангрийский, Гыргыланьи-Дагинский, Южно-Байкальский, Удыльский, Восточно-Сахалинский, Хейтонский, Лонгрийский, Северо-Сахалинский, Западно-Шмидтовский и множество других разломов менее 2 ранга.

### Обсуждение

На основе линеamentного анализа острова Сахалин выявлены зоны подвижек и трещиноватости, примыкающие к области коровых и литосферных разломов. При дешифрировании севера Сахалина в режимах программы LEFA четко выделены разломы, которые ранее описывались различными исследователями [18 – 21]. Выделенные крупные разрывные нарушения сопровождаются наличием оперяющих их дислокаций. После составления карты дизъюнктивных нарушений Северного Сахалина на неё были нанесены местоположения эпицентров землетрясений с магнитудой более 3. Анализ данных показал, что к наиболее протяженным разломам приурочено большинство эпицентров (рис. 2).



#### Условные обозначения

- |   |                      |
|---|----------------------|
| — разломы по спутниковым снимкам                    | землетрясения        |
| — разломы по данным SRTM                            | ★ с магнитудой 7-8   |
| --- предполагаемые разломы (нововыявленные)         | ● с магнитудой 5-6,9 |
| — разломы, выявленные ранее по геологическим картам | ● с магнитудой 4-4,9 |
|   | ● с магнитудой 3-3,9 |

Рис. 2. Карта региональных разломов Севера Сахалина с эпицентрами землетрясений с  $M \geq 3,0$  (1906–2021 гг.)

## Заключение

Разломы, выделенные на севере Сахалина с помощью программы LEFA подтверждают данные геологических и геофизических исследований острова Сахалин, а также дополняют их. Землетрясения, которые происходили в течение последних 30 лет, происходили в зонах, приуроченных к выделенным разломам.

Полученные результаты могут быть использованы для мониторинга, уточнения локализации, конфигурации и параметров разломных зон острова Сахалин.

*Авторы выражают благодарность за консультации и рекомендации по использованию программного комплекса LEFA С. Л. Шевырёву.*

## 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 линейментных систем // Исследование Земли из космоса, 2012. – № 1. – С 3–30.
2. Парначёв В. П. Основы геодинимического анализа: учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2011. – 308 с.
3. Уткин В. П. Сдвиговый тектогенез и структурообразующее течение коровых масс Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода // Литосфера, 2019. – Т. 19. – № 5. – С. 780–799. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-5-780-799>
4. Hobbs W. H. Lineaments of the Atlantic border region // Bulletin of the Geological Society of America, 1904. – Vol. 15. – P. 483–506.
5. Булгаков Р. Ф., Иващенко А. И., Ким Ч. У., Сергеев К. Ф., Стрельцов М. И., Кожурин А. И., Бесстрашнов В. М., Стром А. Л., Сузуки Я., Цуцуми Х., Ватанабе М., Уеки Т., Шимамото Т., Окумура К., Гото Х., Кария Я. Активные разломы Сахалина // Геотектоника, 2002. – Т. 36. – № 3. – С. 227–246.
6. Василенко Н. Ф., Прытков А. С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеанская геология, 2012. – Т. 31. – № 1. – С. 42–48.
7. Рождественский В. С. Роль сдвигов в формировании структуры Сахалина, месторождений углеводородов и рудоносных зон // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. I. Геология и геодинамика Сихотэ-Алинской и Хоккайдо-Сахалинской складчатых областей. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 80–109.
8. USGS EROS Archive. Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey). URL: <https://glovis.usgs.gov/aP> (accessed 17.04.2021)
9. Сайт United States Geological Survey (USGS) [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://doi.org/earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 17.04.2021 г.)
10. Харахинов В. В., Гальцев-Безюк С. Д., Терещенков А. А. Разломы Сахалина // Тихоокеанская геология, 1984. – № 2. – С. 77–86.
11. Canny J. F. A. Computational A Proach to Edge Detection. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1986. – Vol. – pami-8. – No. 6. – NOV. Доступно на: [http://perso.limsi.fr/vezien/P APIERS\\_ACS/canny1986.pdf](http://perso.limsi.fr/vezien/P APIERS_ACS/canny1986.pdf) (дата обращения: 24.03.2021).
12. Chopp D. L. Computing minimal surfaces via level set curvature flow // Journal of Computational Physics, 1993 – V. 106. – No 1. – P. 77– 91.
13. Galamhos C., Matas J. and Kittler J. Progressive probabilistic Hough transform for line detection // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. –

P. 554–560. Доступно на: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/9451/1999-Progressive-probabilistic-Hough-Transform-for-line-detection.pdf?sequence=1> (дата обращения 22.03.2021).

14. 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.

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

16. Shevyrev S. Neotectonics, remote sensing and erosion cut of ore-controlling structures of the Mnogovershinnoe gold-silver deposit (Khabarovsk Krai, Russian Far East). Ore Geology Reviews, 2018. – V. 108. – С. 8–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.016>.

17. The QGIS Line Direction Histogram Plugin. Håvard Tveite. Created using Sphinx 1.6.7. [Electronic resource], URL: <http://plugins.qgis.org/plugins/LineDirectionHistogram/> (accessed 17.04.2021).

18. Кожурин А. И., Лободенко И. Ю., Стром А. Л. Следы сильных землетрясений на полуострове Шмидта – северной части острова Сахалин в голоценовое время // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2009. – № 4. – С. 23–29.

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

20. Василенко Н. Ф., Иващенко А. И., Ким Чун Ун. Деформации земной поверхности в эпицентральной зоне Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана. ИМГиГ ДВО РАН. Отв. ред. А.И. Иващенко. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. – Т. 1. – С. 39–57.

21. Ломтев В. Л., Патрикеев В. Н. Разломы Северного Сахалина: особенности строения и сейсмическая опасность. Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2016. – № 3. – С. 44–58.

22. Рождественский В. С. Тектоническое развитие о. Сахалин // Тихоокеанская геология, 1987. – №3. – С. 42–51

© О. В. Купцова, А. А. Верхотуров, В. А. Мелкий, 2021