

УДК 528.88: 551.24: 004.93

DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-317-329

О.В. Купцова<sup>1</sup>, А.А. Верхотуров<sup>2</sup>, В.А. Мелкий<sup>3</sup>

## КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАЗЛОМОВ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРО-САХАЛИНСКОЙ РАВНИНЫ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

### АННОТАЦИЯ

В статье приводятся результаты исследования разломных зон земной коры в пределах Северо-Сахалинской равнины с помощью линейментного анализа модели SRTM. Разломы выделялись в целях повышения информативности карт геологического содержания. В качестве входных использовались данные SRTM. Анализ выполнялся с помощью функционала программного комплекса LEFA. Использование данных SRTM позволило произвести оценку дизъюнктивных нарушений на территории севера Сахалина. Анализ изображений поверхности равнины производился с использованием операции бинарно-морфологической эрозии или с помощью математических алгоритмов Кэнни с дальнейшей цифровой обработкой посредством преобразований Хафа. В работе выявлено положение линейных элементов на разных участках равнины. Отличной проверкой качества выполненных определений послужили результаты более ранних исследований восточной части Северо-Сахалинской равнины, которые проводились в связи с освоением месторождений углеводородов и после сильного Нефтегорского землетрясения. Полученные данные послужили основой для составления карты дизъюнктивных нарушений севера острова Сахалин масштаба 1:500 000. В зависимости от масштаба, пространственного разрешения и уровня генерализации изображения можно выделить дизъюнктивные 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 с помощью инструментария LEFA позволил выявить зоны, где расположены разрывные нарушения земной коры. В результате проведенного анализа выявлены Западно-Сахалинский, Центрально-Сахалинский, Хоккайдо-Сахалинский (Верхне-Пильтунский сегмент), Пильтунский, Гаромайский, Вал-Лангрыйский, Гыргыланьи-Дагинский, Южно-Байкальский, Удыльский и множество других разломов менее 2 ранга. Основные результаты работы будут полезны при выборе мест для строительства объектов хозяйственного и промышленного назначения, а также при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** цифровая модель рельефа, аэрокосмические съемки, тематическое картографирование, дизъюнктивные нарушения, земная кора, программный комплекс LEFA

---

<sup>1</sup> Сахалинский государственный университет, Технический нефтегазовый институт, ул. Пограничная, 2, 630023, Южно-Сахалинск, Россия; *e-mail*: [Korsuncevaolesy@gmail.com](mailto:Korsuncevaolesy@gmail.com)

<sup>2</sup> Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Центр коллективного пользования, ул. Науки, 1Б, 693022, г. Южно-Сахалинск, Россия; *e-mail*: [ussr-91@mail.ru](mailto:ussr-91@mail.ru)

<sup>3</sup> Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Лаборатория вулканологии и вулканопасности, ул. Науки, 1Б, 693022, г. Южно-Сахалинск, Россия; *e-mail*: [vamelkiy@mail.ru](mailto:vamelkiy@mail.ru)

Olesya V. Kuptsova<sup>1</sup>, Alexey A. Verkhoturov<sup>2</sup>, Vyacheslav A. Melkiy<sup>3</sup>

## MAPING OF FAULTS ON TERRITORY OF THE NORTH SAKHALIN PLAIN BY REMOTE SENSING DATA

### ABSTRACT

The article presents the results of the research of the fault zones of earth's crust within the North Sakhalin plain using the lineament analysis of the SRTM model. The faults be identified in order to increase the information content of the maps of geological content. SRTM data was used as input. The analysis performed using the functionality of the LEFA software package. The use of SRTM data made it possible to assess disjunctive disorders in territory of the north of Sakhalin Island. The images of surface were analyzed using the binary-morphological erosion operation or using Canny mathematical algorithms with further digital processing by means of Hough Transform. The paper reveals the position of linear elements in different parts of the North Sakhalin plain. Excellent test of the quality of performed definitions was the results of earlier studies of the eastern part of the North Sakhalin Plain, which were carried out in connection with the development of hydrocarbon deposits and after the strong Neftegorsk earthquake. The data obtained served as the basis for drawing up a map of disjunctive disturbances of Sakhalin Island at scale of 1: 500,000. Depending from scale, spatial resolution, and level of generalization of image, disjunctive disturbances of different lengths (transregional, regional, sub-regional, local) and ranks (1 rank from a few to hundred meters, 2 rank from a hundred meters to a kilometer, 3 rank from 1 km to 35 km, 4 rank from 35 to 100 km, 5 rank more than 100 km). The analysis of the SRTM model with the help of the LEFA toolkit allowed us to identify the zones where the earth's crust fractures are located. The analysis of the SRTM model with the help of the LEFA toolkit allowed us to identify the zones where the earth's crust fractures are located. As a result of the analysis, the West Sakhalin, Central Sakhalin, Hokkaido-Sakhalin (Upper Piltun segment), Piltun, Garomai, Val-Langri, Gyrgylany-Daginsky, South Baikal, Udyl and many other faults of less than rank 2 were identified. The main results of the work will be useful in choosing places for the construction of economic and industrial facilities, as well as in the search and exploration of mineral deposits.

**KEYWORDS:** digital terrain model, Global Positioning Satellite survey, thematic mapping, disjunctive disturbances, earth's crust, software LEFA

---

<sup>1</sup> Sakhalin State University, Technical Oil and Gas Institute, Pogranichnaya str., 2, 630023, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; *e-mail:* [Korsuncevaolesy@gmail.com](mailto:Korsuncevaolesy@gmail.com)

<sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of RAS, Center for collective use, Nauki str., 1B, 693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; *e-mail:* [ussr-91@mail.ru](mailto:ussr-91@mail.ru)

<sup>3</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of RAS, Laboratory of Volcanology and volcano hazard, Nauki str., 1B, 693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; *e-mail:* [vamelkiy@mail.ru](mailto:vamelkiy@mail.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

Земная кора на всей планете разделена на блоки регматической сетью [Кац, Полетаев, 1986; Анохин, 2006; Бондур, Зверев, 2007], выделенной еще У. Хоббсом [Hobbs, 1904]. В конце прошлого века среди тектонических структур были выделены глобальные сдвиговые зоны [Уткин, 1980, 2019], многочисленные разномасштабные кольцевые структуры [Брюханов и др., 1987], и литосферные вихри [Вихри..., 2004; Изосов, Ли, 2017], сформировавшиеся в результате комбинации горизонтальных и вертикальных тектонических движений. Выявление связей между проявлениями различных литосферных процессов является одной из сложнейших и интереснейших задач фундаментальных исследований в области геодинамики, в то же время определение местоположения дизъюнктивных зон играет важную роль при выборе мест для безопасного строительства объектов хозяйственного и промышленного назначения, а также при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых.

У. Хоббс предложил термин «линеамент» для обозначения линейно вытянутых элементов рельефа и геологической структуры [Hobbs, 1904]. В настоящее время большинство исследователей считают, что линеаменты представляют собой линии резкого изменения параметров географической, геологической и геофизической сред. Линеаменты выделяют на изображениях модели рельефа различного масштаба, при этом различают трансконтинентальные, трансрегиональные, региональные и локальные.

Автоматизированное выделение линеаментов и их статистический анализ с помощью специальных математических программ [Златопольский, 2011, 2015; Шевырев, 2018] дает возможность изучать как глубинные разломы планетарного масштаба, так и слабо выраженные локальные зоны трещиноватости. Исследование дизъюнктивных дислокаций Северо-Сахалинского сегмента, сформировавшегося как межостровной грабен Японо-Сахалинской островной дуги, поднятый в результате перекомпенсации на позднеорогенной стадии ее геологического развития, способствует пониманию природы неотектонических движений территории. [Булгаков и др., 2002; Василенко и др., 2001, 2012; Харахинов, 1984; Ломтев и др., 2015, 2016; Tsutsumi H., 2000].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для обработки были получены данные SRTM Void Filled, которые находятся в свободном доступе на сайте Геологической службы США. Радарная топографическая съемка (Shuttle Radar Topography Mission) была выполнена в рамках международного проекта по сбору радиолокационных данных в период с 11 по 22 февраля 2000 г. Национальным агентством геопространственной разведки и Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (NASA) и представлена в виде данных о высотном положении точек земной поверхности относительно эллипсоида WGS84. Съемка была произведена с борта космического челнока Endeavour, совершившего 176 витков. Точки измерений размещались через 3 угловых секунды (приблизительно 90 м)<sup>1</sup>.

При обработке исходных данных SRTM использовалось программное обеспечение PyLEFA с аналитическим графическим интерфейсом для обнаружения и анализа линеаментов и трещин на основе данных дистанционного зондирования. Программа позволила извлечь линеаментные особенности модели SRTM, определяемые ее параметрами и пространственным разрешением. 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 Кэнни.

<sup>1</sup> USGS EROS Archive. Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey) Доступно на: <https://glovis.usgs.gov/aP> (дата обращения 24.03.2021)

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).

$$A \ominus B = \{z | (B)z \subseteq A\}, \text{ где } A \in Z^2, B \in Z^2$$

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 Кэнни широко используется в системах компьютерного зрения. Он разбит на пять этапов [Canny J.F.A., 1986]. На первом этапе к изображению для его сглаживания и удаления шумов применяется алгоритм фильтрации по Гауссу. Фильтр, использующийся оператором Кэнни, близок к первой производной гауссианы.  $\sigma = 1,4$ :

$$B = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} * A$$

В зависимости от выбора чувствительности детектора к шуму, ядро (5×5) гауссийского фильтра меняется. Чем меньше размер, тем выше чувствительность детектора к шуму.

На втором этапе обработки изображения методом Кэнни происходит поиск градиента интенсивности изображения с помощью четырех фильтров для того, чтобы найти диагональные, вертикальные и горизонтальные края.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

$$\Theta = \text{atan2}(G_y, G_x)$$

Градиент края определяется через значение для первой производной, которую возвращает оператор в вертикальном ( $G_y$ ) и горизонтальном ( $G_x$ ) направлениях, где  $G$  рассчитывается по функции  $\arctan$  от 2 аргумента, обозначающей радианный угол в плоскости Евклида между положительными осями  $x$  и  $y$ . При этом угол направления края округляется до одного из четырех полученных углов, а направление края рассчитывается по определенному значению угла в каждой цветовой области изображения.

На третьем этапе используется метод истончения края. Изображению необходимо избавиться от ложных ответов на обнаружения края, для этого применяются градиенты нижней границы пересечения или величины порога. На данном этапе сравниваются пиксели края с пикселями направлений градиента, к примеру, пиксель в направлении  $x$  сравнивается с пикселем правее и левее по горизонтальной оси. После анализа некоторые значения пикселей подавляются, а некоторые сохраняются.

Четвертый этап алгоритма Кэнни сводится к применению двойного порога, который фильтрует оставшиеся пиксели, вызванные изменением цвета и шумом, чтобы более точно определить потенциальные границы изображения. При выборе низких и высоких пороговых значений отбрасываются пиксели со слабым значением градиента и сохраняются с высоким.

Пятый этап завершает обнаружение краев, подавляя все другие края, являющиеся слабыми и не имеющие отношения к границам.

Дальнейшая цифровая обработка изображения в программе PyLEFA посредством преобразований Хафа позволила выделить линейные элементы рельефа в качестве штрихов. Вероятностное преобразование Хафа выполнялось для части ( $\alpha$ ) точек исходного изображения,  $0\% \leq \alpha \leq 100\%$ . Сначала выделялись «контрольные» точки изображения, и для них проводилось преобразование Хафа. Прямые на уменьшенном изображении с большой вероятностью соответствуют прямым на оригинальном снимке. Объединение элементов в соединенные коллинеарные линии происходило в результате анализа матрицы близости для коэффициентов уравнений обнаруженных линий. Если в строках линий есть одинаковые или близкие коэффициенты, их можно рассматривать как коллинеарные.

Преобразование Хафа представляет известное уравнение прямой в виде параметров данной прямой, углового коэффициента  $k$  и точки пересечения с осью ординат  $b$ . Прямую можно представить в пространстве параметров в виде точки с координатами.

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 [Galambos C., Matas J. and Kittler J., 1999].

Дальнейшее объединение линеаментов происходит по принципу коллинеарности. Результаты обработки изображения экспортируются в shape файл и файл tif, после чего данные файлы открываются в любом программном обеспечении ГИС. Программное обеспечение QuantumGIS (QGIS) было использовано для определения геометрии направления разломов, построения карты разломов Сахалина.

В программе LEFA используется методика исследования, включающая предварительную обработку изображения, алгоритмы детектирования контуров, выделения линейных элементов, учет количества линейных элементов, объединения коллинеарных линейных элементов в линеаменты, нахождение фрактальной размерности контуров изображения, экспорт картографических растров (geotiff) и линейных элементов (shp).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Возвратно-поступательные изменения напряженно-деформированного состояния коры и мантии в период подготовки землетрясений были выявлены также путем анализа динамики линеаментных систем на основе результатов автоматизированной обработки SRTM [Зверев, Зверев, 2015; Зверев и др., 2005]. С этой целью использовались такие показатели динамики линеаментных систем, как розы диаграммы линеаментов и изменение величины отношений суммарных длин локальных и региональных линеаментов разных направлений [Бондур и др., 2005; Лунина, 2016; Udhi, Arum, 2016].

Анализ модели SRTM Севера Сахалина проводился в 6 различных режимах программы PyLEFA: «canny\_small»; «canny\_medium»; «canny\_many»; «erosion\_small»; «erosion\_medium»; «erosion\_many». Чем выше режим заданной чувствительности линий, тем сильнее выделяется трещиноватость на изображении. На снимках четко выделился Пильтунский разлом меридионального простирания, отображаемый узкой зоной линейных объектов, подтвержденный геофизическими данными. Также выявлен ряд линеаментов, отображающих формы тектонических дислокаций: складчатости, трещины, разрывы. В тех местах, где разломы не достигают поверхности, линеаменты выражают область повышенной трещиноватости. Это свидетель-



стствует о повышенном напряженном состоянии земной коры [Трифонов и др., 1983]. Разломы диагонального простирания слева от Пильтунского разлома отображаются в свите полос из линий и указывают на зоны скалывания. [Кац и др., 1986].

Линии на изображениях четко выделились благодаря спектральным характеристикам, отличным от основного спектрального фона.

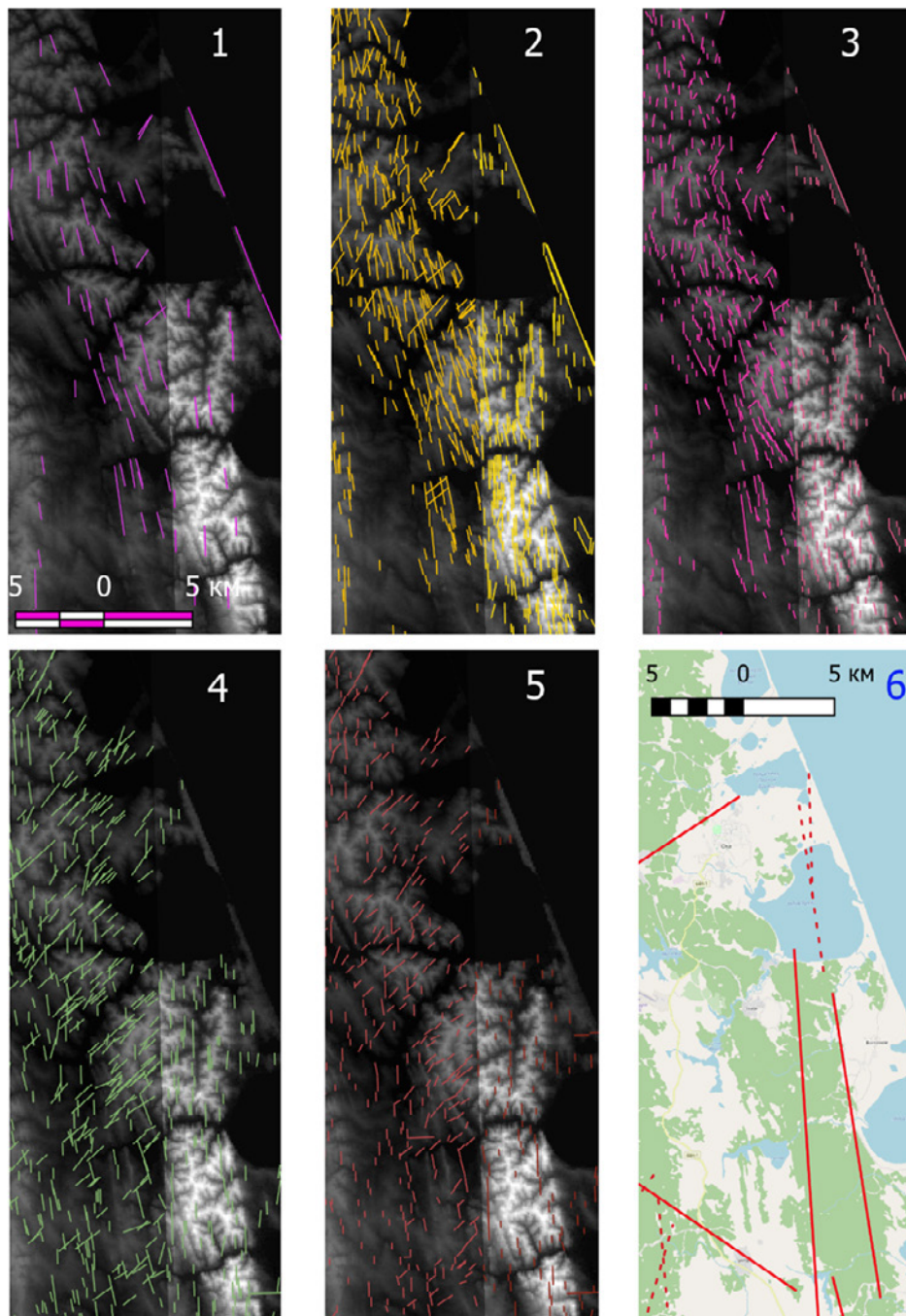


Рис. 1. Фрагменты изображения с линеаментами, выделенными в программе LEFA при использовании различных алгоритмов:

1 – Canny small; 2 – Canny medium; 3 – Canny many; 4 – erosion medium; 5 – erosion many; 6 – положение, выявленных разломов на карте

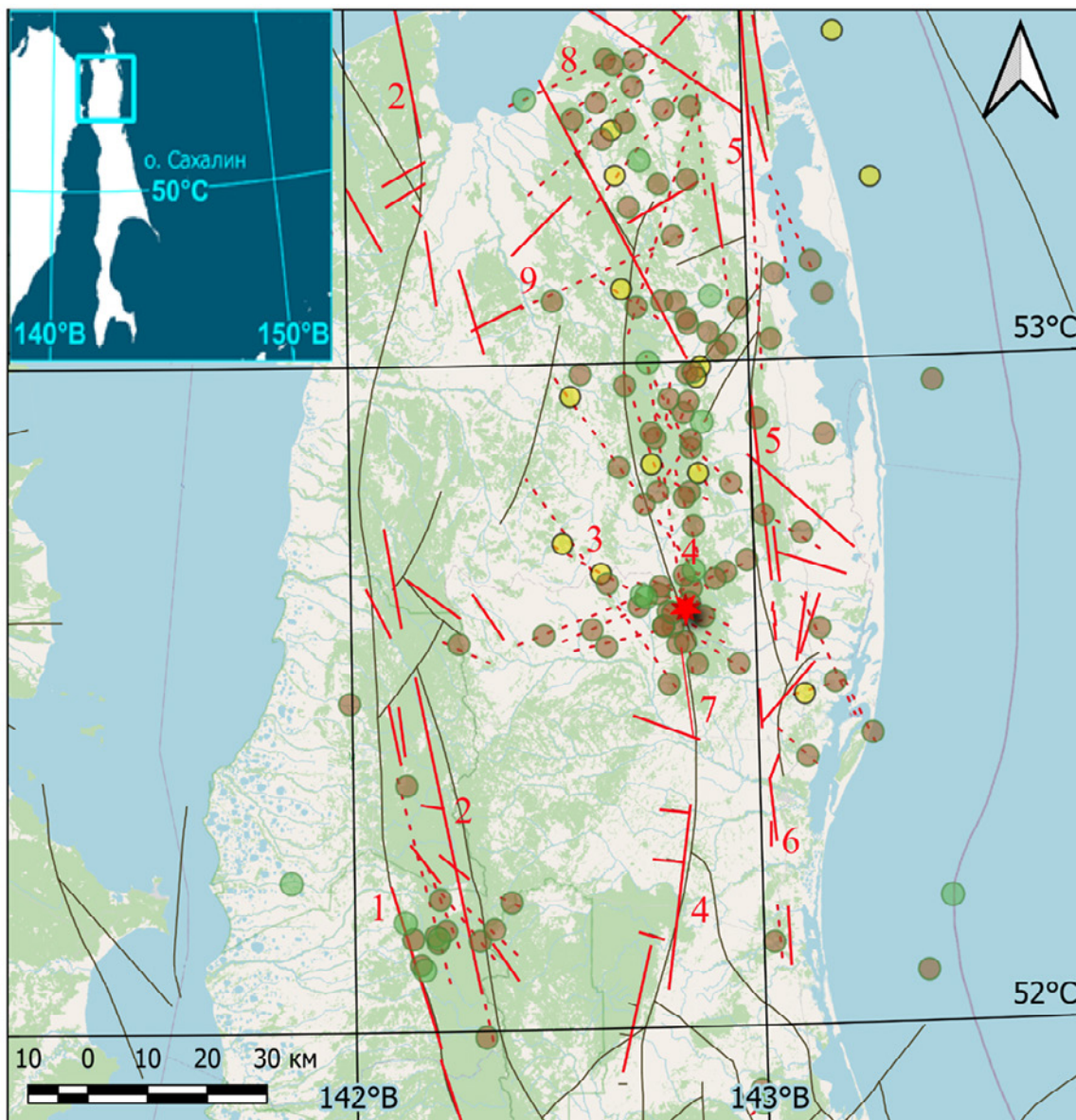
Fig. 1. Image fragments with lineaments selected in the LEFA program using various algorithms: 1 – Canny small; 2 – Canny medium; 3 – Canny many; 4 – erosion medium; 5 – erosion many; 6 – position of identified faults on the map



*Рис. 2. Результат обработки SRTM Северо-Сахалинской равнины в программе LEFA посредством преобразований Хафа в режиме Canny many*

*Fig. 2. The result of processing SRTM of the North Sakhalin Plain in the LEFA program by means of Hough Transform in Canny many*





Условные обозначения

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

Рис. 3. Карта региональных разломов Северо-Сахалинской равнины с эпицентрами землетрясений с  $M \geq 3,0$  (1906–2021 гг.). Региональные разломы:

- 1 – Западно-Сахалинский (Западно-Энгизпальский сегмент); 2 – Центрально-Сахалинский (Восточно-Энгизпальский сегмент), 3 – Вал-Лангрийский; 4 – Хоккайдо-Сахалинский (Верхне-Пильтунский сегмент); 5 – Пильтунский; 6 – Гаромайский; 7 – Гырғыланы-Дагинский; 8 – Южно-Байкальский; 9 – Удыльский

Fig. 3. Map of regional faults of the North Sakhalin plain with epicenters of earthquakes with magnitude  $\geq 3,0$  of 1906–2021. Regional faults:

- 1 – West Sakhalin fault (West Engizpal segment); 2 – Central Sakhalin fault (East Engizpal segment), 3 – Val-Langri fault; 4 – Hokkaido-Sakhalin fault (Upper Piltun segment); 5 – Piltun fault; 6 – Garomai fault; 7 – Gyrgylany-Daginsky fault; 8 – Yuzhno-Baikal fault; 9 – Udylsky fault



Полученные данные послужили основой для составления карты дизъюнктивных нарушений севера острова Сахалин масштаба 1:500 000. В зависимости от масштаба, пространственного разрешения и уровня генерализации изображения, можно выделить дизъюнктивные 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 с помощью инструментария LEFA позволил выявить зоны, где расположены разрывные нарушения земной коры. В результате проведенного анализа выявлены Западно-Сахалинский, Центрально-Сахалинский, Хоккайдо-Сахалинский (Верхне-Пильтунский сегмент), Пильтунский, Гаромайский, Вал-Лангрийский, Гыр-гыланьи-Дагинский, Южно-Байкальский, Удыльский и множество других разломов менее 2 ранга (табл. 1).

Табл. 1. Разломы Северо-Сахалинской равнины, выделенные в различных режимах программы LEFA

Table 1. Faults of the North Sakhalin plain, identified in various modes of the LEFA program

№	Название разлома	Режим выделения	Другие источники информации о разломе
1	Западно-Сахалинский	erosion_medium	Харахинов и др., 1984 Ломтев, Жердева, 2015 Ломтев, Патрикеев, 2016
2	Центрально-Сахалинский	erosion_small,medium	Харахинов и др., 1984 Ломтев, Жердева, 2015
3	Хоккайдо-Сахалинский (Верхне-Пильтунский сегмент)	canny_medium	Харахинов и др., 1984 Василенко и др., 2001 Василенко, Прытков, 2012 Ломтев, Жердева, 2015 Ломтев, Патрикеев, 2016
4	Пильтунский	canny_small	Рождественский, 1993 Василенко и др., 2001 Ломтев, Жердева, 2015
5	Гаромайский	canny_many	Василенко и др., 2001 Булгаков и др., 2002
6	Вал-Лангрийский	canny_many	Василенко и др., 2001
7	Гыргыланьи-Дагинский	erosion_small	Василенко и др., 2001
8	Южно-Байкальский	medium_canny	Лободенко, 2010
9	Удыльский	small_canny	Харахинов и др., 1984

## ВЫВОДЫ

Методика автоматизированного дешифрирования активных разломов, проведенная в разных режимах программы LEFA на примере севера Сахалина, выявила ряд разломных зон, как подтвержденных данными геологических и геофизических исследований, так и новых зон линеаментов, свидетельствующих **о повышенном напряженном состоянии земной коры исследуемых областей.**

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

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность С.Л. Шевыреву за оказанную помощь в качестве консультаций и ценных советов при проведении данного исследования.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to S.L. Shevyrev for his assistance in providing advice and valuable advice in conducting this study.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анохин В.М.* Глобальная дизъюнктивная сеть Земли: строение, происхождение и геологическое значение. СПб.: Недра, 2006. 161 с.
2. *Бондур В.Г., Зверев А.Т., Кузнецова Л.В.* Космический мониторинг динамики систем линеаментов в период подготовки землетрясений в Калифорнии. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 5. С. 47–55.
3. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий. Исследования Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56.
4. *Брюханов В.Н., Буш В.А., Глуховский М.З., Зверев А.Т., Кац Я.Г., Макарова Н.В., Сулиди-Кондратьев Е.Д.* Кольцевые структуры континентов Земли. М.: Наука, 1987. 184 с.
5. *Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У., Сергеев К.Ф., Стрельцов М.И., Кожурин А.И., Бесстраинов 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., 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.
7. *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.
8. Вихри в геологических процессах. Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатского гос. пед. университета, 2004. 297 с.
9. *Зверев А.В., Зверев А.Т.* Применение автоматизированного линеаментного анализа космических снимков при поисках нефтегазовых месторождений, прогнозе землетрясений, склоновых процессов и путей миграции подземной воды. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2015. № 6. С. 14–20.
10. *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.
11. *Златопольский А.А., Златопольский А.А.* Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 38–46.
12. *Златопольский А.А.* Мультимасштабный анализ цифровой модели рельефа. Экспериментальные закономерности. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 27–35.
13. *Изосов Л.А., Ли Н.С.* Проблемы глобальной вихревой геодинамики. Региональные проблемы. 2017. Т. 20. № 1. С. 27–33.
14. *Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф.* Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 140 с.

15. *Лободенко И.Ю.* Голоценовые тектонические нарушения (палеосейсмодислокации) в зонах Хоккайдо-Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Москва: МГУ, 2010. 165 с.
16. *Ломтев В.Л., Жердева О.А.* К сеймотектонике Сахалина: новые подходы. Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015. № 3. С. 56–68.
17. *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.
18. *Лунина О.В.* Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии. Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 407–434. DOI <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>.
19. *Рождественский В.С.* Геодинамическая эволюция Хоккайдо-Сахалинской складчатой системы. Тихоокеанская геология. 1993. № 2. С. 76.
20. *Трифонов В.Г., Макаров В.И., Сафонов Ю.Г., Флоренский П.В.* Космическая информация в геологии. М.: Наука, 1983. 370 с.
21. *Уткин В.П.* Сдвиговые дислокации и методика их изучения. М.: Наука, 1980. 144с.
22. *Уткин В.П.* Сдвиговой 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>.
23. *Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А.* Разломы Сахалина. Тихоокеанская геология. 1984. № 2. С. 77–86.
24. *Шевырев С.Л.* Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab. Успехи современного естествознания. 2018. № 10. С. 138–143.
25. *Canny J. F. A.* Computational A Proach to Edge Detection. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1986. V. pami-8, No. 6. NOV. Доступно на: [http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERS\\_ACS/canny1986.pdf](http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERS_ACS/canny1986.pdf) (дата обращения: 24.03.2021).
26. *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).
27. *Hobbs W.H.* Lineaments of the Atlantic border region. Bull. Geol. Soc. Amer. 1904. V. 15. P. 483–506.
28. *Tsutsumi H., Kozhurin A., Streltsov M.I., Ueki T., Suzuki Y., and Watanabe M.* Active faults and paleoseismology in northeastern Sakhalin II Journal of Geography. 2000. V. 109(2). P. 294–301 (in Japanese).
29. *Udhi C., Arum T.* Lineament density information extraction using DEM SRTM data to predict the mineral potential zone. International Journal of Remote Sensing and Earth Science. 2016. V. 13. No. 1. P. 67–74.

## REFERENCES

1. *Anokhin V.M.* Global Disjunctive Network of the Earth: Structure, Origin and Geological Significance. St. Petersburg: Nedra, 2006. 161 p. (in Russian).
2. *Bondur V.G., Zverev A.T., Kuznetsova L.V.* Space monitoring of the dynamics of lineament systems during the preparation of earthquakes in California. Izvestiya verkhovnykh uchebnykh zavedeniy. Geodesy and Aerial Photography. 2005. No. 5. P. 47–55.
3. *Bondur V.G., Zverev A.T.* Lineament System Formation Mechanisms Registered in Space Images During the Monitoring of Seismic Danger Areas. 2007. No. 1. P. 47–56.
4. *Bryukhanov V.N., Bush V.A., Glukhovskiy M.Z., Zverev A.T., Katz Ya.G., Makarova N.V., Sulidi-Kondratiev E.D.* Ring structures of the Earth's continents. Moscow: Nauka, 1987. 184 p.



5. *Bulgakov R.F., Ivashchenko A.I., Kim Ch.U., Sergeev K.F., Strel'tsov M.I., Kozhurin A.I., Besstrashnov V.M., Strom A.L., Suzuki Y., Tsutsumi H., Watanabe M., Ueki T., Shimamoto T., Okumura K., Goto H., and Kariya Y.* Active Faults in Northeastern Sakhalin. *Geotectonics*. 2002. V. 36 (3). P. 227–246.
6. *Canny J.F.A.* Computational Approach to Edge Detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, V. pami-8, No. 6. NOV. 1986. URL: [http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERS\\_ACS/canny1986.pdf](http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERS_ACS/canny1986.pdf) (accessed: 25.03.2021).
7. *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. URL: <https://dSPACE.cvu.cz/bitstream/handle/10467/9451/1999-Progressive-probabilistic-Hough-Transform-for-line-detection.pdf?sequence=1> (accessed 22.03.2021).
8. *Hobbs W.H.* Lineaments of the Atlantic border region. *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1904. V. 15. P. 483–506.
9. *Izotov L.A., Lee N.S.* Problems of the global vortex geodynamics. *Regional problems*. 2017. V. 20. No. 1. P. 27–33.
10. *Katz Ya.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F.* Fundamentals of lineament tectonics. Moscow: Nedra, 1986. 140 p.
11. *Kharakhin V.V., Galtsev-Besuk S.D., Tereshchenkov A.A.* Fractures of Sakhalin, Tikhookeanskaya Geologiya. 1984. No. 2. P. 77–86.
12. *Lobodenko I.Yu.* Holocene tectonic disturbances (paleoseismodislocations) in the zones of the Hokkaido-Sakhalin and Central Sakhalin faults. Dissertation for the degree of Candidate of Geological and mineralogical Sciences. Moscow: MGU, 2010. 165 p.
13. *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.
14. *Lomtev V.L., Patrikeev V.N.* The faults of the North Sakhalin: features of the structure and seismic hazard. *Geology and useful minerals of the World ocean*. 2016. No. 3. P. 44–58.
15. *Lunina O.V.* The digital map of the Pliocene-quaternary crustal faults in the Southern East Siberia and the adjacent Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016. V. 7. No. 3. P. 407–434. (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215>.
16. *Rozhdestvensky V.S.* Geodynamic evolution of the Hokkaido-Sakhalin folded system. *Pacific Geology*. 1993. No. 2. P. 76.
17. *Shiverev 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.
18. *Trifonov V.G., Makarov V.I., Safonov Yu.G., Florensky P.V.* Space information in geology. 1983. 370 p.
19. *Tsutsumi H., Kozhurin A., Streltsov M.I., Ueki T., Suzuki Y., and Watanabe M.* Active faults and paleoseismology in northeastern Sakhalin II. *Journal of Geography*. 2000. V. 109. No. 2. P. 294–301. (in Japanese).
20. *Utkin V.P.* Shear dislocations and methods of their study. Moscow: Nauka, 1980. 144 p.
21. *Utkin V.P.* Strike-slip related tectogenesis and structure-forming flow of crustal masses of the Asia-Pacific transition zone. *Lithosphere (Russia)*. 2019. V. 19 (5). P. 780–799. (In Russian). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-5-780-799>.
22. *Vasilenko N.F., Ivashchenko A.I., Kim Chun Un* Deformations of the Earth's surface in the epicentral zone of the Neftegorsk earthquake on May 27 (28), 1995. Dynamics of focal zones and forecasting of strong earthquakes in the North-West of the Pacific Ocean. IMGIG FEB RAS. Ed. A.I. Ivashchenko. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG FEB RAS, 2001. V. 1. P. 39–57.
23. *Vasilenko N.F., Prytkov A.S.* Modeling of interaction of lithospheric plates on Sakhalin Island according to GPS observations. 2012. V. 31. No. 1. P. 42–48.

24. Vortices in geological processes. Ed. A.V. Vikulin. Petropavlovsk-Kamchatsky: Publishing House of the Kamchatka State Pedagogical University, 2004. 297 p.
  25. *Zlatopol'sky A.A.* New LESSA technology resources and digital terrain map analysis. Methodology). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2011. V. 8. No. 3. P. 38–46.
  26. *Zlatopol'sky A.A.* Multyscale digital terrain map analysis. Experimental regularities. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015. V. 12. No. 3. P. 27–35.
  27. *Udhi C., Arum T.* Lineament density information extraction using DEM SRTM data to predict the mineral potential zone. *International Journal of Remote Sensing and Earth Science*. 2016. V. 13. No. 1. P. 67–74.
  28. *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. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 2005. No. 5. P. 56–65.
  29. *Zverev A.V., Zverev A.T.* Application of automated lineament analysis of satellite images in the search for oil and gas fields, earthquake prediction, slope processes, and underground water migration paths. *News of higher educational institutions. Geology and exploration*. 2015. No. 6. P. 14–20.
-