

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

СОЗДАНИЕ КАРТЫ РАЗЛОМОВ ЦЕНТРАЛЬНО-КАМЫШОВОГО МЕГАНТИКЛИНОРИЯ ЗАПАДНО-САХАЛИНСКИХ ГОР ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

АННОТАЦИЯ

Сеть разломных зон, обусловленная вертикальными и горизонтальными тектоническими смещениями блоков земной коры относительно друг друга, хорошо просматривается на поверхности Земли на изображениях, полученных по данным космических съемок. Многие исследователи выделяют среди разломов линейные и кольцевые структуры. Линеаменты на космических снимках отмечаются в виде прямолинейных объектов с определенной спектральной яркостью. Исходными данными для проведения экспериментальных исследований послужили снимки со спутника Landsat-8 и данные SRTM. Линеаментный анализ спутниковых снимков и данных SRTM территории Центрально-Камышового мегантиклинория Западно-Сахалинских гор был проведен с использованием функционала программного комплекса LEFA по разработанной технологии дешифрирования. Полученные результаты обрабатывались при помощи инструментария программы QGIS. Статистическая обработка линеаментов Сахалина проводилась на основе исследования распределения направлений линейных сегментов набора векторных данных штрихов и линеаментов. На основе полученных данных составлена карта дизъюнктивных нарушений Центрально-Камышового мегантиклинория Западно-Сахалинских гор масштаба 1:500 000. Анализ модели SRTM с помощью инструментария LEFA позволил выявить зоны, где расположены разрывные нарушения земной коры. В результате проведенного анализа выделен Западно-Сахалинский разлом и множество других разломов менее 2 ранга. Разломные зоны нанесены на карту масштаба 1:500 000. Выявлено, что к Краснопольевскому разлому приурочено 15,3 % от всех землетрясений в этом районе, причем в зоне до 1 км от разлома 70 %, 1–2 км – 19 %, 2–3 км – 9 %, более 3 км – 2 %. Результаты работы будут полезны при выборе мест для строительства объектов хозяйственного и промышленного назначения, а также при сейсмическом районировании территории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционное зондирование, геоинформационное картографирование, дизъюнктивные нарушения, эпицентры землетрясений, LEFA

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

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

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

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

CREATING A FAULT MAP OF THE CENTRAL-KAMUSHOVY MEGANTICLINORIUM OF THE WESTERN SAKHALIN MOUNTAINS BY SPACE SURVEY DATA

ABSTRACT

The network of fault zones caused by vertical and horizontal tectonic displacements blocks of Earth's crust relative to each other is clearly visible on the Earth's surface in images obtained from satellite surveys. Many researchers distinguish linear and annular structures among the faults. Lineaments in satellite images are detected as rectilinear objects with a certain spectral brightness. The initial data for the experimental research includes images from the Landsat-8 satellite and SRTM data. The lineament analysis of satellite images and SRTM data of the Central-Kamyshovy meganticlinorium of the West Sakhalin Mountains was carried out using the functionality of the LEFA software package using the developed decryption technology. The obtained results were processed using the QGIS program tools. Statistical processing of Sakhalin lineaments was carried out on the basis of researching distribution directions of linear segments set of vector strokes data and lineaments data. The map of disjunctive disturbances of the Central-Kamyshovy meganticlinorium of Western Sakhalin Mountains on a scale 1:500 000 was compiled by basis of data obtained. The analysis of SRTM model with the help of LEFA toolkit made it possible to identify zones where discontinuous disturbances of the Earth's crust are located. As a result of analysis, West Sakhalin fault and many other faults of a rank below 2 were identified. Fault zones are mapped on scale of 1:500 000. It was revealed that 15.3 % of all earthquakes in this area were timed to the Krasnopolsky fault, including in the zone within 1 km from the fault – 70 %, 1–2 km – 19%, 2–3 km – 9%, more than 3 km – 2%. The results of work will be useful in choosing places for construction of industrial facilities, as well as for seismic zoning of territory.

KEYWORDS: remote sensing, geoinformation mapping, disjunctive disturbances, earthquake epicenters, LEFA

ВВЕДЕНИЕ

Картографирование разломов и применение новых подходов и технологий для их выявления всегда актуально, потому что расположенные неподалеку от них жилые, производственных здания и объекты инфраструктуры подвергаются определенному риску. При смещении блоков земной коры относительно друг друга происходят землетрясения. Выявление разломных зон позволяет уточнить сейсмичность территории и провести детальное сейсмозонирование. На любой исследуемой территории выделяется сеть разломов, обусловленная движением блоков земной коры относительно друг друга под воздействием эндогенных и космогенных сил [Hobbs, 1904; Бондур и др., 2005; Бондур, Зверев, 2007]. Глобальные зоны вертикальных и горизонтальных тектонических смещений начали выделять в конце прошлого века [Уткин, 1980; Уткин, 2019; Брюханов и др., 1987, Вихри..., 2004; Изосов, Лу, 2017].

Линейно вытянутые элементы рельефа и геологической структуры впервые были отмечены У. Хоббсом [Hobbs, 1904]. Различные зоны градиентов физических полей, райо-

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Volcanology and volcano hazard, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, e-mail: vamelkiy@mail.ru

² Sakhalin State University, Technical Oil and Gas Institute, 2 Pogradichnaya 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

ны перестройки геологических структур, разломы, флексуры, линейные неоднородности литосферы проявляются на поверхности в виде прямолинейных природных компонентов местности, которые и являются линеаменами [Космическая..., 1983]. Линеаменты выделяются на космических изображениях в виде прямолинейных участков, отличающихся по определенной спектральной яркости [Иванченко, 2012; Кац и др., 1986; Kocharyan et al., 2019; Koronovskii et al., 1990].

Для выявления местоположения разрывных структур используются космические снимки и цифровые модели рельефа, такие как SRTM, ASTER, ArcticDEM. Территория в Западно-Сахалинских горах активно осваивается: разрабатываются угольные месторождения, строятся населенные пункты. При этом территорию необходимо исследовать на предмет сейсмоопасности. Изучение вероятности землетрясений следует начинать с выявления разломных зон.

Цель настоящего исследования – создание карт дизъюнктивных нарушений на территории Центрально-Камышового мегантиклинория Западно-Сахалинских гор. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведен анализ геолого-физических данных о разломных зонах исследуемой территории; по данным дешифрирования линеаментных структур созданы карты зон разрывных нарушений центральной части Камышового хребта; на карты нанесены местоположения эпицентров землетрясений; проведена оценка приуроченности эпицентров к разломным зонам. Полученные данные сравнивались с имеющейся информацией о разломах, представленной в базе данных активных разломов Евразии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных данных использовались снимки со спутника Landsat-8 компании Orbital Sciences Corporation и данные SRTM Void Filled (рис. 1). Оба вида исходных данных находятся в свободном доступе на сайте Геологической службы США^{1,2}. Данные SRTM получены благодаря радарной топографической съемке (Shuttle Radar Topography Mission), которая 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) с помощью космического шаттла Endeavour, совершившего 176 витков. Для выполнения данной миссии на космическом корабле были установлены две радиолокационные антенны SIR-C/X-SAR. Spaceborne Imaging Radar-C был соединен с построенным в Германии X-Band Synthetic Aperture Radar. В результате различий между двумя сигналами разных антенн с помощью метода радарной интерферометрии было собрано большое количество информации о рельефе, высотах поверхности Земли. Данные SRTM Void Filled были получены в результате обработки и редактирования первых данных SRTM. При обработке в модель были внесены данные для областей отсутствующих или некачественных данных из других источников о высоте поверхности, а также рассчитанные с помощью алгоритмов интерполяции. Разрешение данных SRTM Void Filled составляет от 1 до 3 угловых секунд, что соответствует разрешению от 30 до 90 м. Разрешение по высоте составляет 1 м. Пример метаданных – SRTM3N48E142V2. По названию данных SRTM можно определить, сколько угловых секунд в пикселе (SRTM3), координаты съемки левого нижнего угла (N48E142), а также версию обработки данных (V2). Результаты миссии были представлены в виде данных о высотном положении точек земной поверхности относительно эллипсоида WGS84 в проекции EPSG 4326.

¹ 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 09.02.2022)

² Сайт United States Geological Survey (USGS). Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 09.02.2022).

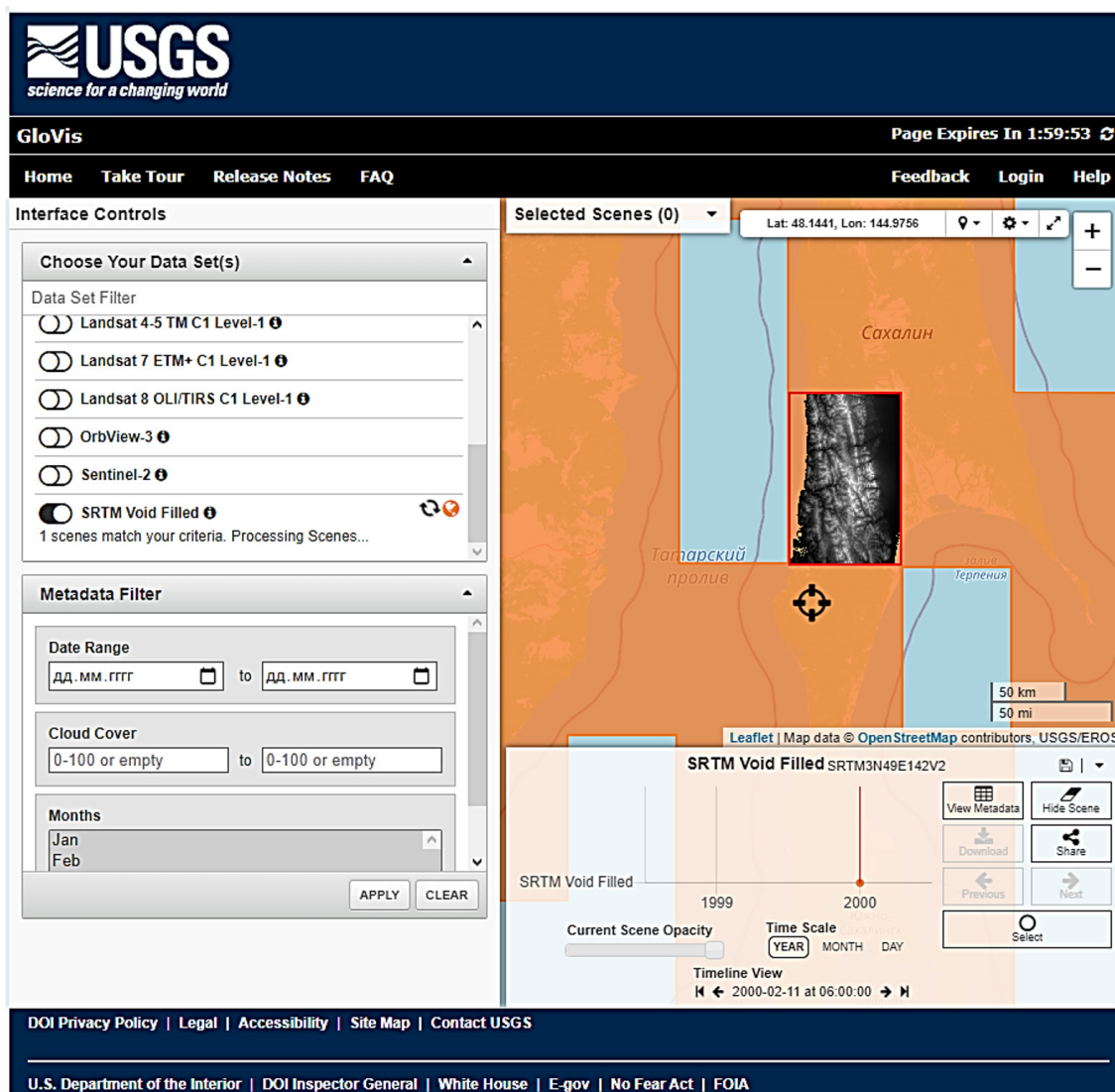


Рис. 1. Интерфейс сайта USGS для скачивания данных SRTM Void Filled
 Fig. 1. The interface of USGS website for downloading SRTM Void Filled data

Данные Landsat-8 получены с помощью съемочной сканирующей аппаратуры OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal Infrared Sensor), разрешение которых на местности составляет от 15 до 100 м. Ширина полосы съемки космического аппарата 185 км, высота орбиты 705 км, наклонение составляет 98,2°, период обращения 98,9 минут, периодичность наблюдения одного и того же места 16 суток, количество витков в сутки 14,6. Пример метаданных LC08_L1TP_107028_20200531_20200608_01_T1_B10. По номенклатуре данных можно определить, данные с какой аппаратуры использовались на снимке местности, «LC» обозначает, что данные «L» – Landsat, «C» – комбинарованные с использованием двух сенсоров OLI и TIRS («O» – OLI; «T» – TIRS, «08» указывает, что данные с Landsat 8, «L1TP» (Landsat Level-1 data product) означает, что снимок прошел геометрическую и радиометрическую коррекцию («L1GS» – Systematic, «L1GT» – Systematic Terrain). Цифры «107» показывают номер столбца или номер участка с запада на восток, а цифры «028» – номер строки или номер участка с севера на юг в глобальной системе индексации данных Worldwide Reference System, то есть эти шесть цифр указывают на тот участок поверхности Земли, который изображен на снимке. Числа «20200531» обозначают год (2020), месяц (05) и дату (31) съемки. Числа «20200608» указывают на год (2020), месяц (06) и дату (08) обработки снимка. Следующие две цифры «01» показывают номер коллекции, «T1» указывает на категорию коллекции («T2» – Tier 2, «T1» – Tier 1, «RT» – Real-Time). Последние цифры «B10» указывают, канал какого

электромагнитного спектра отражен на изображении. Данные аппарата Landsat 8 были скачаны в 11 каналах электромагнитного спектра¹.

Исходные данные Landsat-8 и SRTM были скачаны в формате GeoTIFF (Georeferenced Tagged Image File Format), то есть в файле формата TIFF со встроенной географической информацией (географической привязкой). Скачиваемые данные Landsat 8 помимо 11 файлов с каналами изображений содержат три файла (MTL.txt – файл метаданных Landsat-8 Level-1, ANG.txt – файл, BQA.TIF – файл с данными, отражающими качество пикселя, его информационную нагрузку, его поверхностные, атмосферные и сенсорные характеристики)². Первый уровень обработки BQA (Уровень-1) включает в себя оценку точности позиционирования (Band File), влияние отражения электромагнитных волн от поверхности Земли (LaSRC), данные об отражательной поверхности, генерирующиеся в системе адаптивной обработки сигналов LEDAPS (Landsat Ecosystem Distortance Adaptive Processing System), спектральные индексы (SI), отражение поверхности (SR), рассеивающую способность атмосферы (TOA).

Обработанные данные Landsat имеют следующие характеристики:

- формат GeoTIFF (Geographic Tagged Image File Format), позволяющий определить множество тегов, необходимых для описания картографической проекции. Данный формат позволяет позиционировать изображение в правильной геометрии и расположении на экране геоинформационной системы;

- данные прошли дискретизацию с кубической сверткой, то есть обработаны методом бикубической интерполяции. При обработке данным методом вокруг точки исходного изображения вычисляется среднее взвешенное на участке 4×4 пикселя по 16 ближайшим элементам изображения;

- ориентация снимка на север (вверх) (MAP);

- система координат данных: WGS 84;

- проекция: UTM, также полярная стереографическая для Антарктиды;

- круговое вероятное отклонение для OLI составляет 12 м, это означает, что точность позиционирования составляет 90 % в радиусе окружности 12 м;

- круговое вероятное отклонение для TIRS составляет 41 м, значит 90 % измерений будут точнее 41 м относительно среднего;

- качество цветопередачи данных 16-бит. Пиксел содержит в себе информацию о 65 536 цветах, где объем памяти, используемый для хранения одного пикселя растровой графики, равен 16-бит;

- данные прошли процедуру атмосферной коррекции.

Спутниковые снимки и данные SRTM Приморской цепи Западно-Сахалинских гор были обработаны с помощью линеаментного анализа в программном комплексе Lefa по разработанной технологии дешифрирования [Шевырев, 2018; Купцова и др., 2021; Kuptsova et al., 2021].

В качестве методов детектирования границ в программе использовались алгоритм операции бинарно-морфологической эрозии и математический алгоритм Кенни [Canny, 1986].

Эрозия является основной операцией выделения границ в математической морфологии. В результате эрозии на изображении удаляются все граничные точки, имеющие не менее одного фонового пикселя в своем окружении. Алгоритм обнаружения границ Кенни широко используется в системах компьютерного зрения. С помощью алгоритма Кенни происходит обнаружение границ, подавляются все края, являющиеся слабыми и не имеющие отношения к границам.

¹ Spectral characteristics of Landsat 8 OLI, Landsat 8 TIRS // United States Geological Survey (USGS) Web resource: <https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer> (Accessed 03.03.2022).

² A set of tools for assessing the quality of Landsat ArcGIS // United States Geological Survey (USGS) Web resource: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-quality-assessment-arcgis-toolbox> (Accessed 09.03.2022).

Дальнейшая цифровая обработка изображения в программе PyLEFA посредством преобразований Хафа позволила выделить линейные элементы рельефа в виде штрихов.

Полученные промежуточные результаты были проанализированы в программе QGIS. Статистическая обработка линеаментов Сахалина проводилась на основе исследования распределения направлений линейных сегментов набора векторных данных полученных штрихов и линеаментов. В результате проведенного анализа были выявлены дизъюнктивные нарушения и построена карта исследуемой территории 1:500 000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ортогональные и диагональные взаимосвязанные системы линеаментов были выделены на космических изображениях по известным методикам [Зверев, Зверев, 2015; Зверев *и др.*, 2005]. В качестве показателей динамики линеаментных систем использовались величины отношений суммарных длин региональных и локальных штрихов разных направлений, статистический анализ роз диаграмм линеаментов [Лунина, 2016; *Udhi, Arum*, 2016].

Анализ спутниковых снимков и моделей SRTM Приморской цепи Западно-Сахалинских гор был проведен в 6 различных режимах программы PyLEFA: «*canny_small*»; «*canny_medium*»; «*canny_many*»; «*erosion_small*»; «*erosion_medium*»; «*erosion_many*». Режимы, соответственно, отличаются малой, средней и максимальной чувствительностью к фоновому шуму. При максимальной чувствительности трещиноватость на изображении выделяется наиболее сильно. На снимках наиболее четко выделяется зона Западно-Сахалинского разлома и приуроченные к нему зоны трещиноватости и складчатости. Большинство разрывных нарушений на исследуемой территории подтверждены геофизическими данными, однако выявлен ряд новых разломных зон, что свидетельствует о повышенном напряженном состоянии земной коры [*Космическая...*, 1983] Разломы диагонального простирания справа от Западно-Сахалинского 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. 2).

Полученные данные послужили основой для составления карты дизъюнктивных нарушений Приморской цепи Западно-Сахалинских гор масштаба 1:500 000 (рис. 3). Анализ модели SRTM с помощью инструментария LEFA позволил выявить зоны, где расположены разрывные нарушения земной коры. В результате проведенного анализа четко выделен Краснополюевский разлом, который представляет здесь часть Западно-Сахалинского и множество других разломов менее мелкого ранга. Краснополюевский разлом выделен ранее [Прытков, *Василенко*, 2006; Харахинов *и др.*, 1984; Ломтев, Жердева, 2015; Ломтев, Патрикеев, 2016]. Детальное изучение разлома проводилось в связи с приуроченностью к нему эпицентра крупного Углегорского землетрясения 2000 г. (магнитуда 6,8 балла) [Прытков, *Василенко*, 2006; *Kogan et al.*, 2003].

При использовании алгоритмов «*canny many*» и «*canny small*» в исследуемом районе хорошо прослеживаются разломные зоны северо-западного простирания, пересекающие остров: Нитуйско-Лесогорская, Макаровско-Надымская. В этом же режиме четко выделяются границы сводовой структуры Центрально-Камышового мегаподнятия.

В ходе статистического анализа линейных элементов (разрывных нарушений) и точечных объектов (эпицентров землетрясений) выявлено, что к Западно-Сахалинскому разлому приурочено 15,3 % от всех землетрясений Сахалина, причем в зоне до 1 км от разлома 70 %, 1–2 км – 19 %, 2–3 км – 9 %, более 3 км – 2 %.

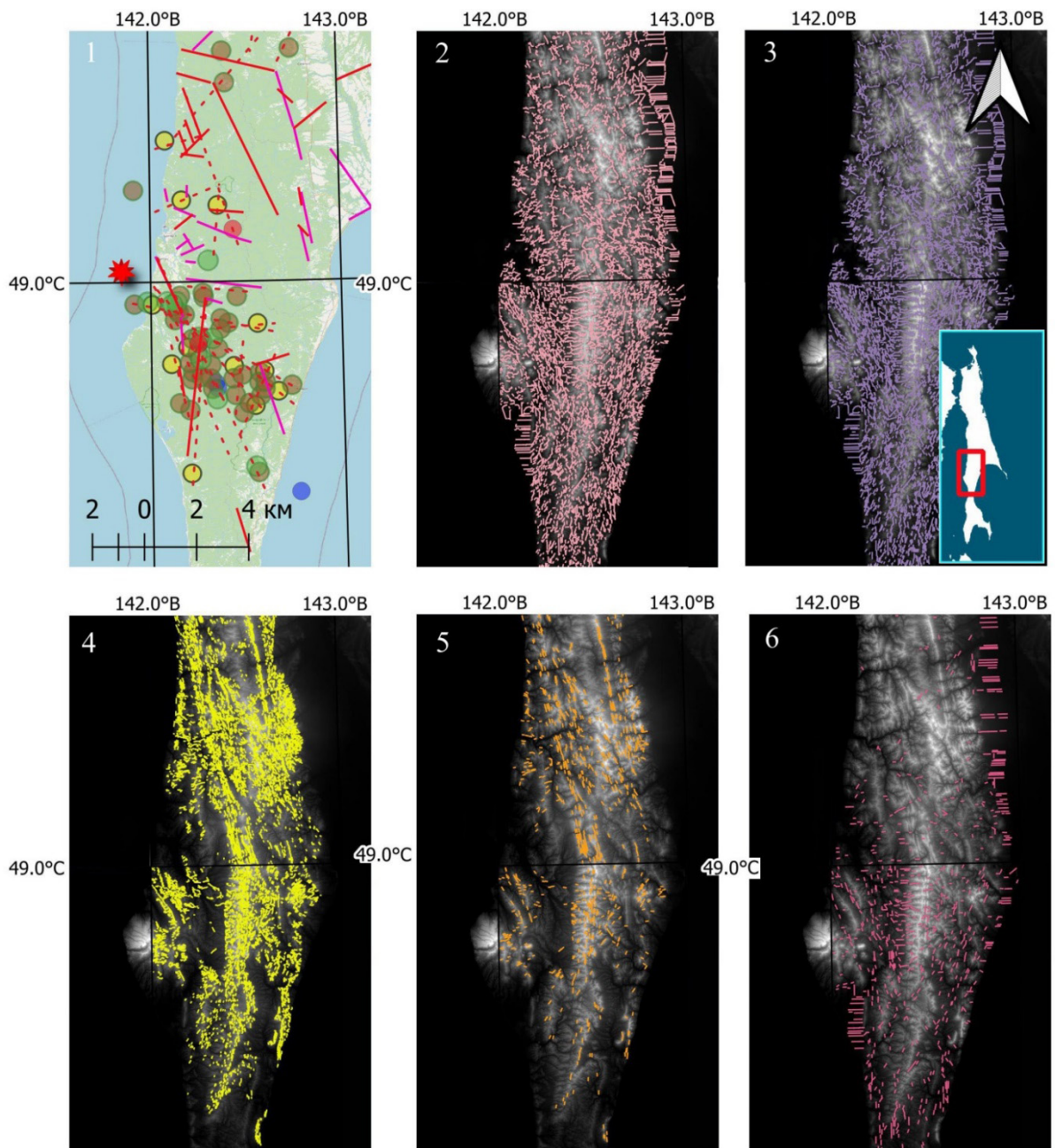


Рис. 2. Фрагменты космических снимков с результатами дешифрирования линеаментов в программе LEFA: 1 – выявленные разломы на карте (условные знаки см. на рис. 3); 2 – разломы, выявленные с применением алгоритма erosion many; 3 – то же, с применением алгоритма erosion medium; 4 – то же, с применением алгоритма canny many; 5 – то же, с применением алгоритма canny small; 6 – то же, с применением алгоритма erosion small.

Fig. 2. Fragments of satellite images with results of interpretation of lineaments in the LEFA program: 1 – identified faults on the map (legend, see in Fig. 3); 2 – faults identified using the 'erosion many' algorithm; 3 – same, using the 'erosion medium' algorithm; 4 – same, using the 'canny many' algorithm; 5 – same, using the 'canny small' algorithm; 6 – the same, using the 'erosion small' algorithm.

блоков земной коры, активизации разрывных нарушений, а также сейсмического районирования территории.

ВЫВОДЫ

Дешифрирование космических снимков Landsat-8 и SRTM, выполненное с помощью программного комплекса LEFA для территории Приморской цепи Западно-Сахалинских гор в 6 различных режимах («canny_small»; «canny_medium»; «canny_many»; «erosion_small»; «erosion_medium»; «erosion_many»), позволило выделить ряд разломных зон, как известных ранее по данными геологических и геофизических исследований, так и новых зон линеаментов, свидетельствующих **о повышенном напряженном состоянии земной коры исследуемой области.**

При проведении исследования четко выделен Краснопольевский разлом и множество других разломов более мелкого ранга. Полученные данные послужили основой для составления карты дизъюнктивных нарушений Центрально-Камышового мегаподнятия Западно-Сахалинских гор масштаба 1:500 000.

При использовании алгоритмов «canny many» и «canny small» в исследуемом районе выявлены разломные зоны северо-западного простирания, пересекающие остров: Нитуйско-Лесогорская, Макаровско-Надымская. В этом же режиме четко выделены границы сводовой структуры Центрально-Камышового мегаподнятия.

Полученные результаты могут быть использованы для мониторинга, уточнения локализации разломов и сейсмического зонирования исследованной части острова Сахалин.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность С.Л. Шевыреву за оказанную помощь в виде 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. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии. Геодинамика и тектонофизика, 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736. DOI: 10.5800/GT-2017-8-4-0314.
2. 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.
3. 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.
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. 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.
6. Вихри в геологических процессах. Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатского гос. пед. университета, 2004. 297 с.
7. Закупин А.С., Каменев П.А., Воронина Т.Е., Богинская Н.В. Оценка сейсмической опасности на юге Сахалина на 2018 год (по данным оперативного каталога). Геосистемы переходных зон, 2018. Т. 2. № 1. С. 52–56. DOI: 10.30730/2541-8912.2018.2.1.052-056.

8. *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.
9. *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.
10. *Иванченко Г.Н.* Линеаментный анализ космоснимков при построении геодинамической модели Тункинской ветви Байкальской рифтовой зоны. Динамические процессы в геосферах, 2012. № 3. С. 74–82.
11. *Изосов Л.А., Ли Н.С.* Проблемы глобальной вихревой геодинамики. Региональные проблемы, 2017. Т. 20, № 1. С. 27–33.
12. *Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф.* Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 140 с.
13. Космическая информация в геологии. *В. Г. Трифонов, В. И. Макаров, Ю. Г. Сафонов, П. В. Флоренский.* Москва : Наука, 1983. 370 с.
14. *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.
15. *Ломтев В.Л., Жердева О.А.* К сейсмотектонике Сахалина: новые подходы. Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2015. № 3. С. 56–68.
16. *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.
17. *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: 10.5800/GT-2016-7-3-0215.
18. *Прытков А.С., Василенко Н.Ф.* Дислокационная модель очага Углегорского землетрясения 2000 г. (о. Сахалин). Тихоокеанская геология, 2006. Т. 25. № 6. С. 115–122.
19. *Сапрыгин С.М.* Разломы и волноводы в недрах Сахалина. Геосистемы переходных зон, 2017. Т. 1. № 4. С. 47–52.
20. *Уткин В.П.* Сдвиговые дислокации и методика их изучения. М.: Наука, 1980. 144 с.
21. *Уткин В.П.* Сдвиговый тектогенез и структурообразующее течение коровых масс Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода. Литосфера, 2019. Т. 19. № 5. С. 780–799. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-5-780-799.
22. *Харахинов В. В., Гальцев-Безюк С. Д., Терещенков А. А.* Разломы Сахалина. Тихоокеанская геология, 1984. № 2. С. 77–86.
23. *Шевырев С.Л.* Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab. Успехи современного естествознания, 2018. № 10. С. 138–143.
24. *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. Web resource: http://perso.limsi.fr/vezien/P_APIERS_ACS/canny1986.pdf (accessed 03.03.2022).
25. *Galamhos C., Matas J., Kittler J.* Progressive probabilistic Hough transform for line detection. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. P. 554–560. Web resource: <https://dSPACE.cvut.cz/bitstream/handle/10467/9451/1999-Progressive-probabilistic-Hough-Transform-for-line-detection.pdf?sequence=1> (accessed 03.03.2022).
26. *Hobbs W.H.* Lineaments of the Atlantic border region. Bull. Geol. Soc. Amer, 1904. V. 15. P. 483–506.

27. Kocharyan G.G., Batuhtin I.V., Budkov A.M., Ivanchenko G.N., Kishkina S.B., Pavlov D.V. On the initiation of dynamic slips on faults by man-made impacts. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019. V. 55. No. 10. P. 1559–1571.
28. Kogan M.G., Burgmann R., Vasilenko N.F., Scholz C.H., King R.W., Ivashchenko A.T., Frolov D.I., Steblov G.M., Kim Ch.U., Egorov S.G. The 2000 Mw 6.8 Uglegorsk earthquake and regional plate boundary deformation of Sakhalin from geodetic data. *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, No 3. 1102. DOI: 10.1029/2002GL016399.
29. Koronovskii N.V., Zlatopol'skii A.A., Ivanchenko G.N. Structural analysis of space imagery via computer-aided interpretation. *Soviet Journal of Remote Sensing*. 1990. V. 6. No 1. P. 114–121.
30. 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. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 946, IV National Scientific Conference with Foreign Participants: Geodynamical Processes and Natural Hazards (4th GeoProNH 2021) 6th–10th September 2021, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation, 2021, 012003 Web resource: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/946/1/012003>.
31. 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).
32. 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. Vol. 13. No 1. P. 67–74.

REFERENCES

1. Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. The active faults of Eurasia database. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017 V. 8 No. 4. P. 711–736. (in Russian). DOI: 10.5800/GT-2017-8-4-0314.
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. (in Russian).
3. Bondur V.G., Zverev A.T. Lineament System Formation Mechanisms Registered in Space Images During the Monitoring of Seismic Danger Areas. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2007. No. 1. P. 47–56. (in Russian).
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. 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. Web resource: http://perso.limsi.fr/vezien/P APIERS_ACS/canny1986.pdf (accessed 03.03.2022).
6. Galamhos C., Matas J., Kittler J. Progressive probabilistic Hough transform for line detection. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1999. P. 554–560. Web resource: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/9451/1999-Progressive-probabilistic-Hough-Transform-for-line-detection.pdf?sequence=1> (accessed 03.03.2022).
7. Hobbs W.H. Lineaments of the Atlantic border region. *Bull. Geol. Soc. Amer*, 1904. V. 15. P. 483–506.
8. Ivanchenko G.N. Lineament analysis of space images in the construction of geodynamic model of Tunka branch of the Baikal rift zone. *Dynamic processes in geospheres*. 2012. No. 3. P. 74–82. (in Russian).
9. Izosov L.A., Lee N.S. Problems of the global vortex geodynamics. *Regional problems*, 2017. V. 20, No. 1. P. 27–33. (in Russian).
10. Katz Ya.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F. Fundamentals of lineament tectonics. Moscow: Nedra, 1986. 140 p. (in Russian).

11. *Kharakhinov V.V., Galtsev-Bezyuk S.D., Tereshchenkov A.A.* Sakhalin Faults. Pacific Geology, 1984. No. 2. P. 77–86 (in Russian).
12. *Kocharyan G.G., Batuhtin I.V., Budkov A.M., Ivanchenko G.N., Kishkina S.B., Pavlov D.V.* On the initiation of dynamic slips on faults by man-made impacts. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 2019. V. 55. No. 10. P. 1559–1571.
13. *Kogan M.G., Burgmann R., Vasilenko N.F., Scholz C.H., King R.W., Ivashchenko A.T., Frolov D.I., Steblov G.M., Kim Ch.U., Egorov S.G.* The 2000 Mw 6.8 Ulegorsk earthquake and regional plate boundary deformation of Sakhalin from geodetic data. Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, No 3. 1102. DOI: 10.1029/2002GL016399.
14. *Koronovskii N.V., Zlatopol'skii A.A., Ivanchenko G.N.* Structural analysis of space imagery via computer-aided interpretation. Soviet Journal of Remote Sensing. 1990. V. 6. No 1. P. 114–121.
15. *Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A., Melkiy V.A.* Mapping faults in the territory of the North Sakhalin Plain according to remote sensing data. InterCarto. InterGIS. Geoinformation support for sustainable development of territories: proceedings of the international. conf. Moscow: Faculty of Geography of Moscow State University, 2021. V. 27. P. 317–329 (in Russian).
16. *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. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 946, IV National Scientific Conference with Foreign Participants: Geodynamical Processes and Natural Hazards (4th GeoProNH 2021) 6th–10th September 2021, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation, 2021, 012003 Web resource: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/946/1/012003>.
17. *Lomtev V.L., Patrikeev V.N.* Faults of Northern Sakhalin: structural features and seismic hazard. Geology and mineral resources of World Ocean, 2016. No 3. P. 44–58 (in Russian).
18. *Lomtev V.L., Zherdeva O.A.* To seismotectonic Sakhalin: new approaches. Geology and mineral resources of World Ocean, 2015. No. 3. P. 56–68 (in Russian).
19. *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: 10.5800/GT-2016-7-3-0215.
20. *Prytkov A.S., Vasilenko N.F.* The dislocation model of the 2000 Ulegorsk earthquake source (Sakhalin Island). Pacific geology. 2006. V. 25. No. 6. P. 115–122 (in Russian).
21. *Saprygin S.M.* Faults and waveguides in the Sakhalin depths. Geosystems of Transition Zones, 2017. V. 1. No. 4. P. 47–52 (in Russian).
22. *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).
23. *Trifonov V.G., Makarov V.I., Safonov Yu.G., Florensky P.V.* Space information in geology. 1983. 370 p. (in Russian).
24. *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).
25. *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. Vol. 13. No 1. P. 67–74.
26. *Utkin V.P.* Shear dislocations and methods of their study. Moscow: Nauka, 1980. 144 p.
27. *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. No. 5. P. 780–799 (in Russian). DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-5-780-799.
28. *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 (in Russian).

29. Vortices in geological processes. *Ed. A.V. Vikulin*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Publishing House of the Kamchatka State Pedagogical University, 2004. 297 p. (in Russian).
 30. *Zakupin A.S., Kamenev P.A., Voronina T.E., Boginskaya N.V.* The estimation of seismic hazard in south part of Sakhalin for 2018 year (based on preliminary catalog). *Geosystems of Transition Zones*, 2018. V. 2. No 1. P. 52–56 (in Russian). DOI: 10.30730/2541-8912.2018.2.1.052-056.
 31. *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. *Proceedings of higher educational establishments. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2005. No. 5. P. 56–65 (in Russian).
 32. *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. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 2015. No. 6. P. 14–20. (in Russian).
-