

УДК 528.44:528.88: 004.93

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4765

Шифр специальности ВАК: 1.6.15, 1.6.19, 1.6.21

Выявление зон разломов земной коры, оказывающих воздействие на южный участок трубопровода проекта «Сахалин-2», по данным космических съемок

О.В. Купцова¹, В.А. Мелкий^{2✉}, А.А. Верхотуров²

¹Сахалинский государственный университет, Россия, г. Южно-Сахалинск

²Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, г. Южно-Сахалинск

✉vamelkiy@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования определяется потребностью в оперативном получении информации о состоянии трасс магистральных трубопроводов и активности эндогенных процессов, происходящих в толщах горных пород, находящихся в зоне взаимодействия с трубой. Подвижки блоков земной коры служат триггерами появления дефектов или аварий при эксплуатации трубопроводных систем. Средства аэрокосмического мониторинга вследствие обзорности, точности и оперативности наилучшим образом соответствуют требованиям к информации, обеспечивающей анализ динамики развития природных процессов. В этом свете разработка методов автоматизированного дешифрирования для определения мест активного воздействия на трубопроводы весьма актуальна. *Цель:* выявление мест пересечения трассы на участке Советское–Пригородное зонами активных разломов для оценки рисков негативного воздействия при организации геотехнического мониторинга в этих зонах. *Объект:* снимки территории, по которой проложены трубопроводы, полученные с космических аппаратов Landsat, Sentinel, а также Shuttle при выполнении проекта SRTM, а также данные о положении эпицентров землетрясений на этой же территории. *Методы:* дешифрирование космических изображений, методы картографирования в геоинформационной среде, статистические, линеаментного анализа. Использование программных комплексов QGIS, ArcGIS, LEFA. *Результаты и выводы.* Проанализирована спутниковая и геофизическая информация о состоянии исследуемой территории, определены разломные зоны, пересекающие трассу трубопроводов проекта «Сахалин-2». Выявлены участки активных разломов, на которые следует обратить пристальное внимание при организации мониторинга в местах возможных подвижек блоков земной коры, которые являются источниками аварийных дефектов трубы. На территории установлены главные трансрегиональные разломные зоны меридионального простирания (I ранга): Хоккайдо-Сахалинская (Охотско-Озерская ветвь зоны разломов Тунайчинской синклинали впадины), Центрально-Сахалинская (Ключевская оперяющая зона разломов) и Западно-Сахалинская (Слепиковско-Невельский участок зоны разломов). Выделены зоны разломов II ранга: Сусунайская – на границе Сусунайского хребта и Сусунайской низменности, а также крупная цепь разломов северо-западно-юго-восточного диагонального простирания, пересекающая трассу трубопровода на Вахрушевско-Христофоровском участке. Кроме того, на снимках выделяются более мелкие разломы III и IV ранга. Сведения о состоянии трубопроводов в местах пересечения с разломными зонами собираются в базах данных аэрокосмического мониторинга трубопроводных систем. Такие данные востребованы при проведении инженерных изысканий, выполнении проектирования и строительства объектов трубопроводного транспорта, а также в процессе эксплуатации трубопроводов.

Ключевые слова: мониторинг земель, космические снимки, линеамент, разлом, сейсмический риск, трубопроводная система, ArcGIS, QGIS, LEFA

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Правительства Сахалинской области в форме субсидии молодым ученым на реализацию научно-исследовательских проектов (Постановление ПСО № 486 от 27.10.2022 г.), выданного Министерством цифрового и технологического развития Сахалинской области (Распоряжение № 122-р от 12.12.2023).

Для цитирования: Купцова О.В., Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Выявление зон разломов земной коры, оказывающих воздействие на южный участок трубопровода проекта «Сахалин-2», по данным космических съемок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 189–201. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4765

UDC 528.44:528.88: 004.93
DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4765

Identification of crustal fault zones, affecting the southern section of the Sakhalin-2 pipeline, according to satellite surveys

O.V. Kuptsova¹, V.A. Melkiy²✉, A.A. Verkhoturov²

¹ Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

² Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

✉ vamelkiy@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to promptly obtain information about the state of the main pipeline routes and the activity of endogenous processes occurring in the rock strata located in the zone of interaction with the pipe. The movements of the blocks of the earth crust serve as triggers for the appearance of defects or accidents during the operation of pipeline systems. Due to their visibility, accuracy and efficiency, aerospace monitoring tools best meet the requirements for information that provides an analysis of the dynamics of the development of natural processes. In this light, the development methods of operational automated decoding to determine the places of active impact on pipelines is very relevant. **Aim.** To identify the intersections of the route on the Sovetskoe–Prigorodnoe section with zones of active faults to assess the risks of negative impacts during operation of pipeline and organize geotechnical monitoring in these zones. **Object.** Images of the territory along which pipelines are laid, obtained from Landsat, Sentinel, and Shuttle spacecraft during the implementation of the SRTM project, suitable for identifying disjunctive faults, as well as data on the position of earthquake epicenters in this territory. **Methods.** Decoding of space images, methods of mapping in a geographic information environment, statistical, lineament analysis. Using software packages QGIS, ArcGIS, LEFA. **Results and conclusions.** The authors have analyzed the satellite and geophysical information on the condition of the studied territory, identified the fault zones crossing the pipeline route of the Sakhalin-2 project. The authors identified the areas of active faults, which should be paid close attention to when organizing monitoring in places of possible movements of blocks of the earth crust, which are sources of emergency pipe defects. Active fault zones have been mapped that warrant focused monitoring efforts in areas susceptible to crustal block displacements, which pose significant risks to pipeline structural safety. The authors established the main transregional fault zones of the meridional strike (rank I) on the territory: Khokkaido-Sakhalinskaya (Okhotsk-Ozerskaya branch of the Tunaichinsky synclinal depression fault zone), Tsentralno-Sakhalinskaya (Klyuchevskaya feathering fault zone) and Zapadno-Sakhalinskaya (Slepikovsko-Nevelskiy section of the fault zone). They identified the fault zones of the II rank: Susunayskaya on the border of the Susunai ridge and the Susunai lowland, as well as a large chain of faults of the north-west-south-east diagonal strike crossing the pipeline route at the Vakhrushevsko-Khristoforovsky section. In addition, smaller grade III and IV faults are highlighted in the images. Information on the condition of pipelines at the points of intersection with fault zones should be collected in databases of aerospace monitoring of pipeline systems. Such data are in demand during engineering surveys, design and construction of pipeline transport facilities, as well as during the operation of pipelines.

Keywords: land monitoring, satellite images, lineament, fault, seismic risk, pipeline system, ArcGIS, QGIS, LEFA

Acknowledgements: The research was supported by a grant from the Government of the Sakhalin Region in the form of subsidies to young scientists for the implementation of research projects (Resolution No. 486 of the GSR dated 10/27/2022), issued by the Ministry of Digital and Technological Development of the Sakhalin Region (Order No. 122-r dated 12/12/2023).

For citation: Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Identification of crustal fault zones, affecting the southern section of the “Sakhalin-2” pipeline, according to satellite surveys. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 189–201. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4765

Введение

Разработка крупных месторождений углеводородов сопровождается развитием трубопроводной сети. Обеспечение безопасной эксплуатации линейной части трубопроводов, обладающих большой протяженностью, требует организации мониторинга их состояния. Повреждения трубопроводов, вызванные природными процессами, приводят

к серьёзным нарушениям технологического регламента транспортировки, иногда к значительным экологическим последствиям, что влечет за собой существенные экономические потери.

Методы моделирования геологических процессов, как экзогенных, так и эндогенных, в коридорах трасс трубопроводов, а также методы их мониторинга на основе дешифрирования космических

снимков опираются на современные представления геодинамики и рассматриваются в трудах [1–13]. Методы дистанционного зондирования дают целостное представление о состоянии территории исследований, обеспечивают оперативной и актуальной информацией о состоянии труб, динамике геологических процессов на участках трубопроводов, недоступных для исследования другими методами.

Литосферные блоки в регионах, подверженных проявлениям активной геодинамики, перемещаются относительно друг друга. Подвижки относительно плоскостей контактов блоков приводят к образованию дизъюнктивных нарушений земной коры. В зависимости от размеров смещаемых блоков в верхних слоях литосферы возникают разномасштабные разломы или разломные зоны, которые могут иметь протяженность от первых десятков метров до сотен и даже тысяч километров [14–21].

Даже незначительные смещения земляных масс в разломных зонах, пересекающих трубопроводы, могут сопровождаться возникновением дефектов труб нефте- и газопроводов [22–24]. Количественная оценка смещений позволяет прогнозировать геологические опасности для трубопроводной системы и своевременно принимать меры для снижения степени риска возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации трасс трубопроводов.

Линеamentный анализ космических снимков территории, по которой проходит трасса магистрального трубопровода, изучение цифровых моделей рельефа, определение местоположения эпицентров землетрясений позволили выделить разрывные нарушения исследуемой территории. Своевременное выявление разломных зон, пересекающих трассу трубопровода, позволяет планировать мероприятия по минимизации риска возможного негативного воздействия на трубу и служит обеспечению безопасной эксплуатации трубопроводной системы.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных использовались материалы космических съемок, полученные с веб-сайтов, где они размещены в свободном доступе. Для линеamentного анализа были отобраны снимки, полученные со спутников Landsat-8 [25], Sentinel [26] и данные проекта Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [27].

Снимки Landsat-8 представлены в формате GeoTIFF, что позволяет легко работать с ними в проектах, создаваемых при помощи геоинформационных технологий, и разнообразных приложениях, предназначенных для обработки изображений.

Данные Landsat-8 доступны в различных уровнях обработки. В исследовании использовались данные с уровнем обработки «Level-1», который

включает снимки, откалиброванные радиометрически и геометрически, которые дополнительно обрабатывались с применением алгоритмов повышения точности геометрической привязки [28].

Файлы, содержащие данные о снимках Landsat-8:

- MTL-файл – файл метаданных, содержащий информацию о параметрах снимка, таких как дата съемки, координаты, углы наблюдения, и другие важные детали.
- BAND_xx – GeoTIFF-файл, который у каждого спектрального диапазона (канала) свой, например, BAND_1, BAND_2 и т. д. Всего со сканера OLI спутника Landsat-8 поступают изображения в 11 спектральных диапазонах.
- BQA-файл – файл качества изображения, содержащий маски облаков, тени облаков и другие артефакты, которые могут повлиять на анализ снимков [29].

Данные радарной топографической модели – SRTM – получены при помощи радарных систем, установленных на борту космического челнока Endeavour в феврале 2000 г. Данные SRTM доступны с пространственным разрешением 30 м (1 дуговая секунда) и 90 м (3 дуговых секунды). Каждый набор данных сопровождается метаданными, которые включают информацию о точности, источниках данных и методах их обработки [27].

Существует несколько программных средств для автоматизированного выделения линеamentов (Lessa, SLAM, LEFA) [30, 31]. В настоящем исследовании выявление дизъюнктивных нарушений производилось с помощью линеamentного анализа, для выполнения которого использовался программный комплекс LEFA (Lineament Extraction and Fault Analysis). Программный комплекс LEFA разработан для автоматизированного анализа данных дистанционного зондирования с целью определения дизъюнктивных нарушений (разломов, разрывов и других структурных деформаций) и представляет собой мощный инструмент для автоматизированного поиска дизъюнктивных нарушений, с помощью которого четко определяются границы объектов и выделяются линейные структуры [32].

Наиболее популярным и эффективным методом для выделения контуров в изображениях является алгоритм Кэнни [33], разработанный Джоном Ф. Кэнни в 1986 г., который включает несколько шагов, направленных на обнаружение четких и точных границ объектов в изображении. Алгоритм Кэнни, который широко используется благодаря своей точности и надежности, является мощным инструментом для выделения контуров. Он включает операции сглаживания, градиентного анализа, подавления немаксимумов и двойного порогового значения для получения четких и значимых контуров объектов на изображении.

Первоначально изображение сглаживается с помощью гауссового фильтра для уменьшения шума, который может добавлять ложные контуры. Для каждого пикселя изображения с помощью операторов Собеля вычисляются градиенты интенсивности в горизонтальном и вертикальном направлениях. Далее рассчитываются общий градиент и направление градиента, после чего реализуется этап подавления немаксимумов. Этот шаг направлен на подавление всех пикселей градиента, которые не являются максимумами в направлении градиента. Это делается для того, чтобы оставить только тонкие линии на местах контуров. Пиксель рассматривается как контурный, если его градиент больше, чем у соседних пикселей в направлении градиента. Затем выполняется двойная пороговая обработка, которая используется для классификации пикселей как сильных, слабых и подавленных. Два порога – высокий и низкий – определяют эти категории:

- пиксели с градиентами выше высокого порога считаются «сильными» контурами;
- пиксели с градиентами между низким и высоким порогами считаются «слабыми» контурами;
- пиксели с градиентами меньше низкого порога подавляются (принимая значение 0).
- Затем осуществляется гистерезисное пороговое значение:
- слабые контуры объединяются с сильными, если они связаны с ними, что позволяет сохранить непрерывные линии контуров;
- это гарантирует, что только значимые и непрерывные контуры остаются на изображении.

Дальнейшая обработка производится при помощи алгоритма Хафа [34]. Метод преобразования Хафа позволяет эффективно выявлять линейные структуры в изображениях даже при наличии шума и других артефактов.

Преобразование Хафа для прямых линий основано на параметрическом представлении прямой линии. Прямая линия на плоскости может быть выражена уравнением:

$$y = mx + b,$$

где m – наклон линии; b – место пересечения линейной оси y .

Однако использование этого уравнения в алгоритме Хафа неудобно, так как наклон m может принимать бесконечные значения. Вместо этого используется параметрическая форма уравнения прямой:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta,$$

где ρ – расстояние от начала координат до ближайшей точки на прямой линии (перпендикулярное расстояние); θ – угол между осью x и линией, перпендикулярной данной прямой.

Алгоритм преобразования Хафа включает в себя преобразование координат, аккумуляторное пространство, голосование и нахождение пиков.

В рамках преобразования координат каждая точка (x, y) изображения преобразуется в пространство параметров (ρ, θ) . Это происходит для всех возможных углов θ (обычно от 0 до 180 градусов), создавая синусоидальную кривую в пространстве (ρ, θ) .

Далее создается двумерный массив (аккумуляторное пространство), где одна ось соответствует значениям ρ , а другая – θ . Каждый элемент этого массива представляет собой количество голосов (вкладов) за конкретную пару (ρ, θ) . Этот массив инициализируется нулями.

В ячейке аккумуляторного пространства, соответствующей найденным значениям ρ и θ , увеличивается значение счетчика. Этот процесс называется голосованием. То есть, если точка (x, y) соответствует определенной линии в пространстве параметров, она «голосует» за ячейку этой линии, увеличивая значение счетчика в этой ячейке.

После обработки всех точек изображения аккумуляторное пространство будет содержать высокие значения (пики) в тех ячейках, которые соответствуют параметрам ρ и θ прямых линий, проходящих через наибольшее количество точек изображения. Поиск пиков в аккумуляторном пространстве позволяет определить параметры линий [34].

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования проводились на участке магистрального газопровода проекта «Сахалин-2» от промышленной площадки «Советское» до с. Пригородное, где располагается завод по сжижению природного газа (СПГ). Территорию юго-восточной части Сахалина, по которой проходит участок трубопровода, пересекают многочисленные разломы. Наиболее целостная картина распределения активных деформаций на исследуемой территории представлена в базе данных активных разломов Евразии (рис. 1) [35, 36].

В зависимости от протяженности «сквозные структуры» Земли подразделяют на планетарные (надрегиональные), региональные, субрегиональные и локальные [37–39]. Смещения в плоскостях, субпараллельных разломным, сопровождаются землетрясениями, которые происходят в местах, где превышен предел прочности пород. Землетрясения, в свою очередь, служат триггерами активизации гравитационных склоновых процессов.

Как известно, разломные зоны образуют две планетарные системы: ортогональную (тянутся в меридиональном или в широтном направлении) и диагональную (вытянуты с северо-запада на юго-восток или северо-востока на юго-запад). При этом

на платформах обычно распространена диагональная система, а в подвижных поясах – соответствующая простиранию тектонических структур. Особенности распределения регматической сети и генетическим аспектам формирования разломных зон посвящено большое количество трудов [40–45].

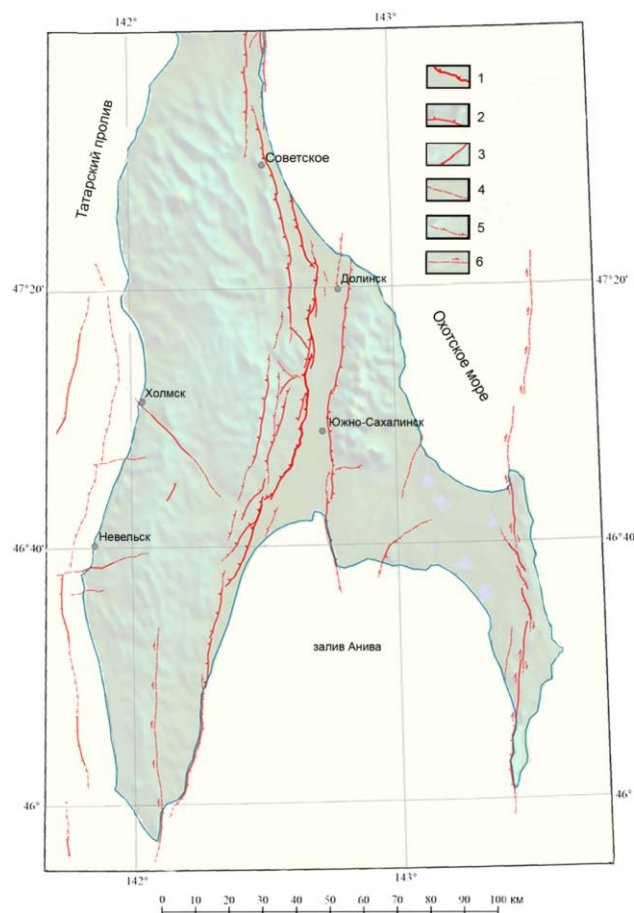


Рис. 1. Линеаменты юга Сахалина в базе данных разломов Евразии (по информации Базы данных активных разломов Евразии [35, 36]). Степень достоверности проявлений активности: 1 – градация А (наиболее достоверные); 2 – градация В; 3 – градация С; 4 – градация D; 5 – взброс; 6 – правостдвиговый разлом

Fig. 1. Lineaments of south of Sakhalin in the Eurasian fault database (according to the Eurasian Active Fault Database [35, 36]). The degree reliability of activity manifestations: 1 – gradation A (most reliable); 2 – gradation B; 3 – gradation C; 4 – gradation D; 5 – upsurge; 6 – right-thrust fault

Анализ космических снимков территории, по которой трубопровод проходит на южном участке, выполненный с помощью программного комплекса LEFA, позволил выявить проявления разрывной тектоники, которые обнаруживают себя в виде линеаментов. Разрывные нарушения исследуемой территории были выявлены благодаря алгоритмам

обработки изображений, таким как фильтрация, выделение детектирования границ изображения посредством бинарно-морфологической эрозии контуров Кэнни и преобразования Хафа.

Элементы геологической структуры, как правило, достаточно хорошо выделяются на местности (линии хребтов, линейные складки, бровки и подножья склонов, рвы, прямые элементы речных каньонов, бровки овражно-балочных систем, прямые участки береговых линий морей, озер, водохранилищ и многие другие). Для линеamentного анализа подбирались космические снимки высокого разрешения, на которых размеры пикселей существенно меньше ширины исследуемого линейного объекта. В автоматизированном режиме кроме природных линеаментов дешифрируются искусственные – каналы, автомобильные и железные дороги, трассы трубопроводов и прочие, которые заведомо упраздняются в интерактивном режиме с изображений. Если удалить антропогенные объекты в автоматизированном режиме невозможно, их «вручную» убирают со схем дешифрирования линеаментов, полученных с использованием программных комплексов Lessa или LEFA [3].

Сначала изображения, подготовленные для анализа, были преобразованы в бинарные, на которых объекты представлены белыми пикселями (значение 1), а фон – черными (значение – 0). Выбор шага квадратной матрицы для дискретизации изображения и размера пространственного окна анализа очень важен. Этим выбором определяется размер линеаментов, которые требуется выделить линии или границы разломных зон. Для каждого пикселя бинарного изображения проверялось соответствие структурному элементу (небольшой квадратной матрицей 3×3 пикселя с центральным элементом и окружающими его соседями). Если все пиксели в окрестности соответствуют структурному элементу, центральный пиксель сохранялся. В противном случае, он заменялся на 0 (черный). Этот процесс можно представить как «размытие» границ объектов на изображении при уменьшении их размеров.

Линеamentный анализ спутниковых изображений, который хорошо зарекомендовал себя при выполнении других исследований [46–52], позволил выявить зоны дизъюнктивных нарушений в юго-восточной части Сахалина, в том числе те, которые не были обнаружены ранее (рис. 2).

Автоматизированное дешифрирование изображений территории, по которой проходит трубопровод, позволило определить местоположение разрывных нарушений. В результате анализа выявлены зоны разломов и разломы различной протяженности [53]: I ранга – сотни и тысячи километров (надрегиональные), II ранга – десятки и сотни км (региональные), III ранга – километры и десятки

км, IV ранга – сотни и тысячи метров. При линейном анализе космических снимков определены наиболее крупные трещины V ранга (более 10 м) (рис. 3). Выявить трещины VI–IX рангов (менее 10 м) на космических снимках при современном уровне развития съемочной техники не удастся.

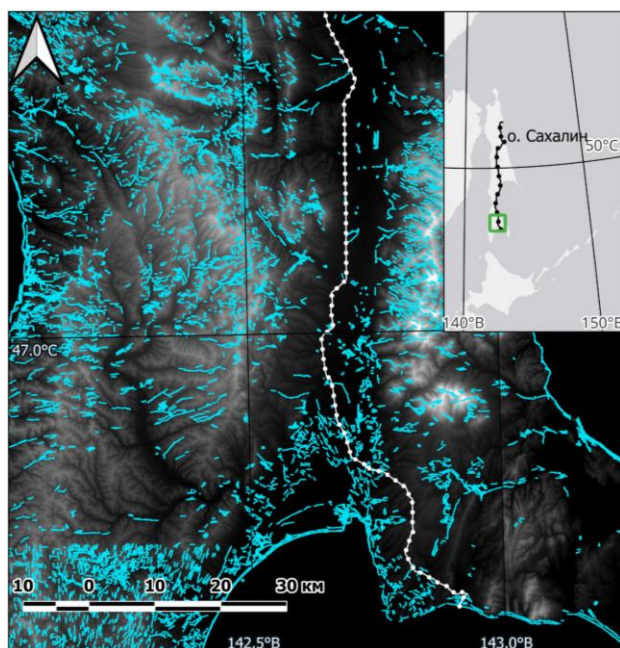


Рис. 2. Линеаменты юга Сахалина, выявленные с применением алгоритма Canny many
Fig. 2. Lineaments of the south Sakhalin, identified using the Canny many algorithm

Большую часть исследуемой территории занимают блоки земной коры Хоккайдо-Сахалинской системы островных поднятий Японо-Сахалинской островной дуги – Крильонский и Сусунайский, которые разделены Анивским прогибом. С западной стороны островодужные блоки сопряжены с Западно-Хоккайдской шельфовой ступенью, примыкающей непосредственно к Япономорской депрессии, которая плавно переходит на севере в Татарско-Устьамурскую рифтовую систему прогибов. С восточной стороны система островодужных поднятий ограничена структурными блоками Охотоморской депрессии. При линейном анализе выделены разломные трансрегиональные зоны меридионального простирания: Центрально-Сахалинская, представленная Ключевским сегментом, Хоккайдо-Сахалинская (Охотско-Озерская ветвь зоны разломов Тунайчинской синклинали впадины), Западно-Сахалинская (Слепиковско-Невельский участок зоны разломов) (таблица). В плане разломные зоны представляют собой ряд субпараллельных нарушений. Видимая ширина зон достигает нескольких километров. Характерными особенно-

стями зон разломов являются большая протяжённость, значительная глубина заложения и длительность развития.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ
●●● трубопровод
— разломы по данным Landsat
— разломы по данным SRTM
--- выявленные разломы
— разломы, обозначенные на геологической карте
● Эпицентры землетрясений
● магнитудой 5,0 - 5,9
● магнитудой 4,0 - 4,9
● магнитудой 3,0 - 3,9
● магнитудой 0 - 2,9

Рис. 3. Схема расположения магистрального трубопровода и разломов, выявленных на исследуемой территории (зеленый прямоугольник). Цифрами обозначены разломы: 1 – Центрально-Сахалинский; 2 – Сусунайский; 3 – Хоккайдо-Сахалинский; 4 – Западно-Сахалинский

Fig. 3. Layout of the main pipeline and the identified faults in the research area (green rectangle). The following faults are indicated by numbers: 1 – Tsentralno-Sakhalinskiy; 2 – Susunayskiy; 3 – Khokkaido-Sakhalinskiy; 4 – Zapadno-Sakhalinskiy

Кроме того, на исследуемой территории выделены региональные разломные зоны II ранга: Сусунайская со сбросами амплитудой от 60 м (в районе п. Соловьевка) до 130 м (в районе п. Христофоровка), а также крупная цепь разломов диагонального простирания, ориентированная с северо-запада на юго-восток, которая пересекает трассу трубопровода на Вахрушевско-Христофоровском участке.

На космических снимках территории также выделяется большое количество локальных разломных зон III ранга, пересекающих трубопровод проекта «Сахалин-2»: Найбинская (долина р. Найбы), Малотакойско-Соколовская (долины рр. Малый Такой и Сокол, Лировско-Колкинская, Сусуинско-Раутинско-Волынская).

Таблица. Надрегиональные разломы исследуемой территории, выделяемые с помощью программы LEFA

Table. Supra-regional faults of the studied area, identified using the LEFA program

Название разлома Fault name	Характер смещений по разлому Character of the displacements along the fault	Другие источники информации о разломе Other sources of information about the fault
Хоккайдо-Сахалинский (Охотско-Озерская ветвь зоны разломов Тунайчинской синклинали впадины) Khokkaido-Sakhalinskiy (Okhotsk-Ozerskiy fault zone branch of Tunaychinsky synclinal trough)	Взбросо-сдвиговые смещения на протяжении >1500 км. Ширина зоны (часто с опережающими разломами) достигает 7 км. Вертикальные смещения с мелового времени (K ₂) <1,5 км, горизонтальные – <5 км Thrust-strike-slip displacements extend for >1500 km. The width of the zone (often with associated splay faults) reaches 7 km. Vertical displacements since the Late Cretaceous (K ₂) are <1,5 km, while horizontal displacements are <5 km	[54–56]
Центрально-Сахалинский (Ключевская опережающая зона разломов) Tsentralno-Sakhalinskiy (Klyuchevskaya feathering fault zone)	Взбросо-надвиговые смещения на протяжении >1000 км. Ширина зоны (часто с опережающими разломами) достигает 10 км. Максимальные скорости горизонтальных деформаций (до 50 ×10 ⁻⁹ в год), наибольшее сжатие отмечались в районе повышенной сейсмической активности, при этом зона растяжений асейсмична Thrust-reverse displacements extend for >1000 km. The width of the zone (often featuring splay faults) reaches 10 km. The maximum horizontal strain rates (up to 50 ×10 ⁻⁹ per year) were recorded in the area of heightened seismic activity, while the extensional zone remains aseismic	[54–57]
Западно-Сахалинский (Слепиковско-Невельский участок зоны разломов) Zapadno-Sakhalinskiy (Slepikovsko-Nevelskiy section of the fault zone)	Сбросовые и взбросо-сдвиговые смещения на протяжении >1000 км. Ширина зоны (часто с опережающими разломами) достигает 10 км. Вертикальные смещения с мелового времени (K ₂) <1,5 км, горизонтальные – <5 км Fault system displays normal and thrust-strike-slip displacements persisting over >1000 km, with a zone width of up to 10 km (commonly containing splay faults). Cumulative vertical displacement since K ₂ is <1,5 km, contrasting with horizontal offsets of <5 km	[57]

Разломы субширотной системы прерывают разломы субмеридиональной системы или сами прерываются ими, что привело к формированию мелкоблочного структурного плана исследуемой территории. Обычно эти разломы являются сбросами, сбросо-сдвигами и сдвигами и имеют небольшую протяженность.

Перемещения масс горных пород в зонах дислокаций приводят к разрушениям линейных сооружений, в том числе объектов трубопроводного транспорта. Сведения о состоянии трубопроводов в местах пересечения с разломными зонами должны собираться в базах данных аэрокосмического мониторинга трубопроводных систем, которые обеспечивают создание геопространственных моделей с целью анализа текущей обстановки [58]. Такие модели востребованы при проведении инженерных изысканий, выполнении проектирования и строительства объектов трубопроводного транспорта, а также в процессе эксплуатации при проведении геотехнического мониторинга трубопроводов [59–61].

Заключение

Линеаментный анализ космических снимков территории, по которой трубопровод «Сахалин-2» проходит от промышленной площадки «Советское» до завода СПГ, позволил получить целостное представление о дизъюнктивных нарушениях поверхности литосферы и направленности неотекто-

нических процессов и обнаружить зоны разрывных нарушений, представляющих опасность для объектов инфраструктуры трубопровода.

На территории установлены главные трансрегиональные разломные зоны меридионального простирания (I ранга): Хоккайдо-Сахалинская (Охотско-Озерская ветвь зоны разломов Тунайчинской синклинали впадины), Центрально-Сахалинская (Ключевская опережающая зона разломов) и Западно-Сахалинская (Слепиковско-Невельский участок зоны разломов). Кроме того, выделены зоны разломов II ранга: Сусунайская на границе Сусунайского хребта и Сусунайской низменности, а также крупная цепь разломов северо-западно-юго-восточного диагонального простирания, пересекающая трассу трубопровода на Вахрушевско-Христофоровском участке. На снимках выделены более мелкие разломы III и IV ранга.

Возникновение разнонаправленной сети разломов (меридиональных и диагональных), как и структурного плана юга о. Сахалин в целом, объясняется вначале диагональным (северо-запад–юго-восток), а затем субширотным горизонтальным сжатием со стороны активных рифтовых и спрединговых впадин Японского и Охотского морей [57]. Еще одной особенностью геодинамической обстановки юга Сахалина является наличие области растяжений к востоку от Сусунайского разлома, которая выявлена ранее по результатам геодинамических процессов и обнаружить зоны разрывных нарушений, представляющих опасность для объектов инфраструктуры трубопровода.

зического мониторинга и отличается от окружающей территории, находящейся в условиях горизонтального сжатия [56].

Модели, создаваемые на основе аэрокосмического мониторинга трубопроводных систем, должны включаться в проект Цифровая Земля, в котором предполагается аккумулирование информации обо всех системах и формах жизни, включая человеческие сообщества. Многомерный, многомасштабный, многовременной и многослойный ин-

формационный проект Цифровая Земля – необходимая платформа, служащая обеспечению целей устойчивого развития и формированию «безопасного рабочего пространства для человечества» [62].

Дальнейшие исследования разломных зон должны быть направлены на детализацию блоковой структуры территории, определение особенностей генезиса разломообразования и выявление закономерностей активизации наиболее крупных структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонович К.М., Карпик А.П. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий и других методов определения положения // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2003. – № 6. – С. 123–135.
2. Бондур В.Г., Гапонова Е.В. Регистрация из космоса аномальных вариаций линейментных систем Байкальской рифтовой зоны в период землетрясения с магнитудой $M=5.6$, состоявшегося 21 сентября 2020 года // Исследование Земли из космоса. – 2021. – № 2. – С. 3–14. DOI: 10.31857/S0205961421020020
3. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линейментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исследования Земли из космоса. – 2007. – № 1. – С. 47–56.
4. Зверев А.Т. Кинематика и динамика движений литосферных плит // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 5. – С. 22–33.
5. Карпик А.П., Каленицкий А.И., Соловицкий А.Н. Технология изучения изменений во времени деформаций блоков земной коры при освоении месторождений Кузбасса // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2013. – № 4 (24). – С. 3–11.
6. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцев Э.Ф. Основы линейментной тектоники. – М.: Недра, 1986. – 144 с.
7. Комиссаров А.В. Технология мониторинга защитных сооружений магистральных нефтепроводов методами геодезии и дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2024. – Т. 29. – № 1. – С. 65–72. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-1-65-72
8. Кузьмин Ю.О. Современные объемные деформации разломных зон // Физика Земли. – 2022. – № 4. – С. 13–18. DOI: 10.1134/s1069351322040061
9. Малинников В.А., Зверев А.Т., Донов В.В. Методика оценки оползневой опасности на Черноморском побережье Кавказа на основе линейментного анализа аэрокосмических изображений // Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2007. – № 6. – С. 86–92.
10. Seismic response of natural gas and water pipelines in the Ji-Ji earthquake / W.W. Chen, B.J. Shih, Y.C. Chen, J.H. Hung, H.H. Hwang // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2002. – Vol. 22. – № 9–11. – P. 1209–1214.
11. Mercante E., Antunes J.F.G. Simulation of a gas pipeline pathway integrating remote sensing data and geographic information systems // Acta Scientiarum. Technology. – 2010. – Vol. 32. – № 2. – P. 171–178.
12. Tarolli P., Mudd S.M. Introduction to remote sensing of geomorphology // Developments in Earth Surface Processes. – 2020. – Vol. 23. – P. XIII–XV. DOI: 10.1016/B978-0-444-64177-9.09992-6
13. Active faults and paleoseismology in northeastern Sakhalin II / H. Tsutsumi, A. Kozhurin, M.I. Streltsov, T. Ueki, Y. Suzuki, M. Watanabe // Journal of Geography. – 2000. – Vol. 109. – № 2. – P. 294–301.
14. Космогеология СССР / Н.С. Афанасьева, В.И. Башилов, В.Н. Брюханов и др. / под ред. В.Н. Брюханова, Н.В. Межеловского. – М.: Недра, 1987. – 239 с.
15. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии / пер. с немецкого. – М.: Мир, 1988. – 344 с.
16. Ломизе М.Г., Хаин В.Е. Геотектоника с основами геодинамики. – М.: Кн. дом Университет, 2005. – 560 с.
17. Трифонов В.Г., Кожурин А.И. Проблемы изучения активных разломов // Геотектоника. – 2010. – № 6. – С. 79–98.
18. Анохин В.М. Глобальная дизъюнктивная сеть Земли: строение, происхождение и геологическое значение. – СПб.: Недра, 2006. – 161 с.
19. O'Driscoll E.S.T. The double helix in global tectonics // Tectonophysics. – 1980. – Vol. 63. – № 1. – P. 397–417.
20. Steinberger B., Schmeling H., Marquart G. Large-scale lithospheric stress field and topography induced by global mantle circulation // Earth and Planetary Science Letters. – 2001. – Vol. 186. – P. 75–91.
21. Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismology / C. Tiberi, M. Diamant, J. Déverchère, C. Petit-Mariani, V. Mikhailov, S. Tikhotsky, U. Achauer // Journal of. Geophysical Research: Solid Earth. – 2003. – Vol. 108. – № B3. – P. 2133. DOI: 10.1029/2002JB001880
22. Математическое моделирование динамики перемещений оползневых склонов в условиях техногенных воздействий / В.С. Хорошилов, О.Г. Поплавская, Н.Н. Кобелева, Х.К. Ямбаев // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2023. – Т. 28. – № 1. – С. 45–58. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-1-45-58
23. Arun S.B., Kesavan K., Parivallal S. Recent advances in health monitoring and assessment of inservice oil and gas buried pipelines // Journal of the Institution of Engineers (India): Series A. – 2018. – Vol. 99. – P. 729–740. DOI: https://doi.org/10.1007/s40030-018-0316-5.
24. Khoroshilov V.S., Kobleva N.N., Noskov M.F. Analysis of possibilities to use predictive mathematical models for studying the dam deformation state // Journal of Applied and Computational Mechanics. – 2022. – Vol. 8. – № 2. – P. 733–744. DOI: 10.22055/JACM.2022.38005.3129

25. Landsat Missions. Website United States Geological Survey (USGS). URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (дата обращения 15.05.2024).
26. Sentinel Missions. Website European Space Agency (Electronic Materials). URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (дата обращения 15.05.2024).
27. 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> (дата обращения 15.05.2024).
28. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook L8DS-1574.Version 1 / Approved by K. Zanter. – Sioux Falls, South Dakota, EROS, Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2015. – 105 p. URL: <https://spationetblog.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/06/landsat8datausershandbook.pdf> (дата обращения 15.05.2024).
29. Geosample: Открытый набор геоданных для различного ПО ГИС // GIS-Lab (географические информационные системы и дистанционное зондирование) и авторы. – 2002-2024. URL: <https://gis-lab.info/qa/geosample.html/> (дата обращения 15.05.2024).
30. Zlatopolsky A.A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Computers & Geosciences. – 1997. – Vol. 23. – № 1. – P. 45–62.
31. The Seismo-Lineament Analysis Method (SLAM): a reconnaissance tool to help find seismogenic faults / V.S. Cronin, M. Millard, L. Seidman, B. Bayliss // Environmental & Engineering Geoscience. – 2008. – Vol. 14. – № 3. – P. 199–219.
32. Шелышев С.Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 138–143.
33. Canny J.F. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – Vol. 8. – P. 679–698.
34. Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes // Pattern Recognition. – 1981. – Vol. 13. – № 2. – P. 111–122.
35. База данных активных разломов Евразии и прилегающих акваторий (AFEAD) // Сайт ГИН РАН, лаборатория неотектоники и современной геодинамики, 2015–2024. URL: <http://neotec.ginras.ru/database.html> (дата обращения 15.05.2024).
36. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset / E.A. Zelenin, D.M. Bachmanov, S.T. Garipova, V.G. Trifonov, A.I. Kozhurin // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14. – P. 4489–4503. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>
37. Анохин В.М., Одесский И.А. Характеристики глобальной сети планетарной трещиноватости // Геотектоника. – 2001. – № 5. – С. 3–9.
38. Тектонолинементы и некоторые вопросы геотектоники / И.Э. Ломакин, В.М. Анохин, В.В. Кочелаб, В.В. Покалюк, Н.В. Шафранская, И.Н. Шураев // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2016. – № 3 (45). – С. 59–75.
39. Smoot N.Ch. Orthogonal intersections of megatrends in the Western Pacific ocean basin: a case study of the Mid-Pacific mountains // Geomorphology. – 1999. – № 30. – P. 323–356. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00060-4)
40. Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. статья 2: основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. – 2015. – Т. 6 (1). – С. 1–43. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>
41. Ackermann R.V., Schlische R.W., Withjack M.O. The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws // Journal of Structural Geology. – 2001. – Vol. 23 (11). – P. 1803–1819. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00028-1)
42. Caine J.S., Bruhn R.L., Forster C.B. Internal structure, fault rocks, and inferences regarding deformation, fluid flow, and mineralization in the seismogenic Stillwater normal fault, Dixie Valley, Nevada // Journal of Structural Geology. – 2010. – Vol. 32 (11). – P. 1576–1589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.03.004>
43. Crider J.G., Pollard D.D. Fault linkage: three-dimensional mechanical interaction between echelon normal faults // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1998. – Vol. 103 (10). – P. 24373–24391. DOI: <https://doi.org/10.1029/98jb01353>
44. Displacement/length scaling relationships for normal faults; a review, critique, and revised compilation / B.A. Lathrop, C.A.-L. Jackson, R.E. Bell, A. Rotevatn // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.907543>
45. Dependence of displacement-length scaling relations for fractures and deformation bands on the volumetric changes across them / R.A. Schultz, R. Soliva, H. Fossen, C.H. Okubo, D.M. Reeves // Journal of Structural Geology. – 2008. – Vol. 30 (11). – P. 1405–1411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.08.001>
46. Анохин В.М., Маслов Л.А. Опыт изучения закономерностей направленности и протяженности линейментов и разломов в регионах // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2015. – № 1 (25). – С. 7–18.
47. 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 Междуг. конф. – М.: Географический факультет МГУ, 2021. – Т. 27. – Ч. 1. – С. 317–329. DOI: [10.35595/2414-9179-2021-1-27-317-329](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-1-27-317-329)
48. Картографирование разрывных нарушений по данным аэрокосмических съемок с целью обеспечения безопасности магистральных трубопроводов (на примере участка Чайво – Де-Кастри) / О.В. Купцова, В.А. Мелкий, А.А. Верхотуров, Д.В. Долгополов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 6. – С. 92–102.
49. Мелкий В.А., Купцова О.В., Верхотуров А.А. Создание карты разломов Центрально-Камышового мегантиклинория Западно-Сахалинских гор по данным космических съемок // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2022. – Т. 28. – № 1. – С. 417–429.
50. Мелкий В.А., Купцова О.В., Верхотуров А.А. Автоматизированное картографирование разрывных нарушений в районе перешейки Поясок (Сахалин) по данным дистанционного зондирования // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2023. – Т. 29. – № 1. – С. 346–360. DOI: [10.35595/2414-9179-2023-1-29-346-360](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2023-1-29-346-360)

51. Сычугова Л.В., Фазилова Д.Ш. Выделение сквозных структур на основе линеamentного анализа: на примере территории Ферганской долины // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2022. – Т. 28. – № 1. – С. 408–416. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-408-416.
52. Wang J., Ye Z.-R., He J.-K. Three-dimensional mechanical modeling of large-scale crustal deformation in China constrained by the GPS velocity field // Tectonophysics. – 2008. – Vol. 446. – P. 51–60. DOI: 10.1016/j.tecto.2007.11.006
53. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) от 13.11.2020 № 439 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» (Зарегистрировано в Минюсте России 18.12.2020 № 61603). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=466110> (дата обращения 15.05.2024).
54. Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. Разломы Сахалина // Тихоокеанская геология. – 1984. – № 2. – С. 77–86.
55. Ломтев В.Л., Жердева О.А. К сейсмотектонике Сахалина: новые подходы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2015. – № 3 (41). – С. 56–68.
56. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPS-наблюдений // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – № 2. С. 503–514. DOI: 10.5800/GT-2018-9-2-0358.
57. Рождественский В.С. Активный рифтинг в Японском и Охотском морях и тектоническая эволюция зоны Центрально-Сахалинского разлома в кайнозой // Тихоокеанская геология. – 2008. – Т. 27. – № 1. – С. 17–28.
58. Долгополов Д.В. Теоретическое обоснование принципов формирования геопространственных моделей трубопроводных систем // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2022. – Т. 66. – № 5. – С. 87–97. DOI: 10.30533/0536-101X-2022-66-5-87-97
59. Долгополов Д.В. Моделирование объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 84. – № 5. – С. 43–51. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-995-5-43-51
60. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте / Д.В. Долгополов, М.Ю. Баборыкин, Е.В. Жидиляева, В.А. Мелкий // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2 (52). – С. 25–34. DOI: 10.25714/MNT.2022.52.003
61. Zirrig W., Hausmann D., Schreier G. High-resolution remote sensing used to monitor natural gas pipelines. Earth Observation Magazine. – 2002. – № 11. – P. 12–17.
62. Fukui H., Man D.C., Phan A. Digital Earth: platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables // Big Earth Data. – 2021. – Vol. 5. – № 4. – P. 476–496. DOI: <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1948677>

Информация об авторах

Олеся Витальевна Купцова, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли, Сахалинский государственный университет, Россия, 634008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290; Korsuncevaolesy@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9555-3238>

Вячеслав Анатольевич Мелкий, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б; vamelkiy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8919-8508>

Алексей Александрович Верхотуров, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и региональной геологии Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б; ussr-91@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3826-7339>

Поступила в редакцию: 05.07.2024

Поступила после рецензирования: 06.09.2024

Принята к публикации: 19.03.2025

REFERENCES

1. Antonovich K.M., Karpik A.P. Monitoring of objects using GPS technologies and other methods of position determination. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 2003, no. 6, pp. 123–135. (In Russ.)
2. Bondur V.G., Gaponova E.V. Registering from space anomalous variations of Baikal Rift zone lineament systems during the M=5.6 earthquake occurred on September 21, 2020. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, vol. 57, no. 9, pp. 1012–1020. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0205961421020020.
3. Bondur V.G., Zverev A.T. Lineament system formation mechanisms registered in space images during the monitoring of seismic danger areas. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2007, no. 1, pp. 47–56 (In Russ.)
4. Zverev A.T. Kinematics and dynamics of movements of lithospheric plates. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 2017, no. 5, pp. 22–33. (In Russ.)
5. Karpik A.P., Kalenitsky A.I., Solovitsky A.N. Technology for investigating time changes of earth blocks deformation in Kuzbass coal deposits development. *Vestnik SGGA (Siberian State Academy of Geodesy)*, 2021, vol. 26, no. 3, pp. 36–43. (In Russ.)
6. Kats Ya.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F. *Fundamentals of lineament tectonics*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 144 p. (In Russ.)
7. Komissarov A.V. Technology for monitoring protective structures of main oil pipelines by geodesy and remote sensing methods. *Vestnik SGUGiT*, 2024, vol. 29 (1), 65–72. (In Russ.)

8. Kuzmin Yu.O. Recent volumetric deformations of fault zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 445–458. (In Russ.)
9. Malinnikov V.A., Zverev A.T., Donovan V.V. Methodology for assessing landslide danger on the Black sea coast of the Caucasus based on lineament analysis of aerospace images. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 2007, no. 6, pp. 86–92. (In Russ.)
10. Chen W.W., Shih B.J., Chen Y.C., Hung J.H., Hwang H.H. Seismic response of natural gas and water pipelines in the Ji-Ji earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, vol. 22, no. 9–11, pp. 1209–1214.
11. Mercante E., Antunes J.F.G. Simulation of a gas pipeline pathway integrating remote sensing data and geographic information systems. *Acta Scientiarum. Technology*, 2010, vol. 32, no. 2, pp. 171–178.
12. Tarolli P., Mudd S.M. Introduction to remote sensing of geomorphology. *Developments in Earth Surface Processes*, 2020, vol. 23, pp. XIII–XV. DOI: 10.1016/B978-0-444-64177-9.09992-6
13. Tsutsumi H., Kozhurin A., Streltsov M.I., Ueki T., Suzuki Y., Watanabe M. Active faults and paleoseismology in northeastern Sakhalin II. *Journal of Geography*, 2000, vol. 109, no. 2, pp. 294–301.
14. Afanasyeva N.S., Bashilov V.I., Bryukhanov V.N. *Cosmogeochemistry of the USSR*. Eds. V.N. Bryukhanov, N.V. Mezhelovsky. Moscow, Nedra Publ., 1987. 239 p. (In Russ.)
15. Kronberg P. *Remote sensing of the Earth. Fundamentals and methods of remote sensing in geology*. Translated from German. Moscow, Nedra Publ., 1988. 344 p. (In Russ.)
16. Lomize M.G., Khain V.E. *Geotectonics with the basics of geodynamics: a textbook for university students*. Moscow, University Book House Publ., 2005. 560 p. (In Russ.)
17. Trifonov V.G., Kozhurin A.I. Problems of studying active faults. *Geotectonics*, 2010, no. 6, pp. 79–98. (In Russ.)
18. Anokhin V.M. *The global disjunctive network of the Earth: structure, origin and geological significance*. St Petersburg, Nedra Publ., 2006. 161 p. (In Russ.)
19. O'Driscoll E.S.T. The double helix in global tectonics. *Tectonophysics*, 1980, vol. 63, no. 1, pp. 397–417.
20. Steinberger B., Schmeling H., Marquart G. Large-scale lithospheric stress field and topography induced by global mantle circulation. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, vol. 186, pp. 75–91.
21. Tiberi C., Diament M., Déverchère J., Petit-Mariani C., Mikhailov V., Tikhotsky S., Achauer U. Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, vol. 108, no. B3, p. 2133. DOI: 10.1029/2002JB001880
22. Khoroshilov V.S., Poplavskaya O.G., Kobeleva N.N., Yambaev Kh.K. Mathematical modeling of the displacement dynamics of landslide slopes under the conditions of technogenic impacts. *Vestnik SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2023, vol. 28, no. 1, pp. 45–58. (In Russ.) DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-1-45-58
23. Arun S.B., Kesavan K., Parivallal S. Recent advances in health monitoring and assessment of inservice oil and gas buried pipelines. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 2018, vol. 99, pp. 729–740. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0316-5>.
24. Khoroshilov V.S., Kobeleva N.N., Noskov M.F. Analysis of possibilities to use predictive mathematical models for studying the dam deformation state. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 733–744. (In Russ.) DOI: 10.22055/JACM.2022.38005.3129
25. *Landsat Missions. Website United States Geological Survey (USGS)*. Available at: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (accessed 15 May 2024).
26. *Sentinel Missions. Website European Space Agency (Electronic Materials)*. Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (accessed 15 May 2024).
27. USGS EROS Archive. Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. *GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey)*. Available at: <https://glovis.usgs.gov/aP> (accessed 15 May 2024).
28. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook L8DS-1574.Version 1*. Approved by K. Zanter, Sioux Falls, South Dakota, EROS, Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2015, 105 p. Available at: <https://spationetblog.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/06/landsat8datausershandbook.pdf> (accessed 15 May 2024).
29. Geosample: Open Set of Geodata for various GIS software. *GIS-Lab (Geographic Information Systems and Remote Sensing) and the Authors*. 2002–2021. Available on: <https://gis-lab.info/qa/geosample.html/> (accessed 15 May 2024).
30. Zlatopolsky A.A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA. *Computers & Geosciences*, 1997, vol. 23, no. 1, pp. 45–62.
31. Cronin V.S., Millard M., Seidman L., Bayliss B. The Seismo-Lineament Analysis Method (SLAM): a reconnaissance tool to help find seismogenic faults. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2008, vol. 14, no. 3, pp. 199–219.
32. Shiverov S.L. LEFA software: an automatized structural analysis of remote sensing imagery in MATLAB environment. *Advances in Current Natural sciences*, 2018, no. 10, pp. 138–143. (In Russ.)
33. Canny J.F. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, vol. 8, pp. 679–698.
34. Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition*, 1981, vol. 13, no. 2, pp. 111–122.
35. Database of active faults of Eurasia and adjacent waters (AHEAD). *Website Geological Institute of the RAS, Laboratory of Neotectonics and Modern Geodynamics*, 2015–2024 Available at: <http://neotec.ginras.ru/database.html> (accessed 15 May 2024).
36. Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14, pp. 4489–4503. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>
37. Anokhin V.M., Odesskiy I.A. Characteristics of the global network of planetary fracturing. *Geotectonics*, 2001, no. 5, pp. 3–9. (In Russ.)
38. Lomakin I.E., Anokhin V.M., Kochelab V.V., Pokalyuk V.V., Shafranskaya N.V., Shuraev I.N. Tectonolineaments and some geotectonic problems. *Geology and minerals of the World Ocean*, 2016, no. 3 (45), pp. 59–75. (In Russ.)

39. Smoot N.Ch. Orthogonal intersections of megatrends in the Western Pacific ocean basin: a case study of the Mid-Pacific mountains. *Geomorphology*, 1999, no. 30, pp. 323–356. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00060-4)
40. Seminsky K.Zh. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 2: main stages and prospects. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2015, vol. 6 (1), pp. 1–43. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>
41. Ackermann R.V., Schlische R.W., Withjack M.O. The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws. *Journal of Structural Geology*, 2001, vol. 23 (11), pp. 1803–1819. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00028-1)
42. Caine J.S., Bruhn R.L., Forster C.B. Internal structure, fault rocks, and inferences regarding deformation, fluid flow, and mineralization in the seismogenic Stillwater normal fault, Dixie Valley, Nevada. *Journal of Structural Geology*, 2010, vol. 32 (11), pp. 1576–1589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.03.004>
43. Crider J.G., Pollard D.D. Fault linkage: three-dimensional mechanical interaction between echelon normal faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, vol. 103 (10), pp. 24373–24391. DOI: <https://doi.org/10.1029/98jb01353>
44. Lathrop B.A., Jackson C.A.-L., Bell R. E., Rotevatn A. Displacement/length scaling relationships for normal faults; a review, critique, and revised compilation. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.907543>
45. Schultz R.A., Soliva R., Fossen H., Okubo C.H., Reeves D.M. Dependence of displacement-length scaling relations for fractures and deformation bands on the volumetric changes across them. *Journal of Structural Geology*, 2008, vol. 30 (11), pp. 1405–1411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.08.001>
46. Anokhin V.M., Maslov L.A. Experience study regularity of direction and length for lineaments and faults in regions. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational and Scientific Center". Series: Earth Sciences*, 2015, no. 1 (25), pp. 7–18. (In Russ.)
47. Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A., Melkiy V.A. Mapping of faults on territory of the North Sakhalin plain by remote sensing data. *InterCarto. GI support of sustainable development of territories. Proc. of the International conference*. Moscow, MSU, Faculty of Geography Publ., 2021. Vol. 27, P. 1, pp. 317–329. (In Russ.) DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-317-329
48. Kuptsova O.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Dolgoplov D.V. Fault mapping by data of aerospace surveys to ensure the safety of main pipelines (for example of the section Chayvo–De-Kastri Pipeline). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 6, pp. 92–102. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/6/3826
49. Melkiy V.A., Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A. Creation of a fault map of the Central Reed meganticlinory of the Western Sakhalin Mountains based on satellite surveys. *InterCarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 417–429. (In Russ.) DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-417-429
50. Melkiy V.A., Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A. Automated mapping of faults in the area of Poyasok isthmus (Sakhalin) by remote sensing data. *InterCarto. InterGIS*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 346–360. (In Russ.) DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-346-360
51. Sychugova L.V., Fazilova D.S. Determination of transverse structures based on lineament analysis: a case study of the Fergana valley. *InterCarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 408–416. (In Russ.) DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-408-416
52. Wang J., Ye Z.-R., He J.-K. Three-dimensional mechanical modeling of large-scale crustal deformation in China constrained by the GPS velocity field. *Tectonophysics*, 2008, vol. 446, pp. 51–60. DOI: 10.1016/j.tecto.2007.11.006
53. Order of Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision No. 439 dated 13/11/2020 "On Approval of Federal Norms and Rules in the field of industrial safety "Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps" (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 18/12/2020 No 61603). (In Russ.) Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=466110> (accessed 15 May 2024).
54. Kharakhinov V.V., Galtsev-Bezyuk S.D., Tereshchenkov A.A. Faults of Sakhalin. *Pacific Geology*, 1984, no. 2, pp. 77–86 (In Russ.)
55. Lomtev V.L., Zherdeva O.A. On seismotectonics Sakhalin: new approaches. *Geology and useful minerals of the World Ocean*, 2015, no. 3, pp. 56–68. (In Russ.)
56. Prytkov A.S., Vasilenko N.F. Earth surface deformation of the Sakhalin Island from GPS data. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 503–514. DOI: 10.5800/GT-2018-9-2-0358.
57. Rozhdestvenskii V.S. Active rifting in the Japan and Okhotsk Seas and the tectonic evolution of the Central Sakhalin fault zone in the Cenozoic. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 15–24. (In Russ.)
58. Dolgoplov D.V. Theoretical substantiation of the principles of formation of geospatial models of pipeline systems. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 2022, vol. 66, no. 5, pp. 87–97. (In Russ.) DOI: 10.30533/0536-101X-2022-66-5-87-97
59. Dolgoplov D.V. Modeling of pipeline transportation facilities based on remote sensing data. *Geodezia i Kartografia*, 2023, vol. 84, no. 5, pp. 43–51. (In Russ.) DOI: 10.22389/0016-7126-2023-995-5-43-51
60. Dolgoplov D.V., Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Melkiy V.A. Application of air laser scanning technology in geotechnical monitoring for pipeline transport. *Monitoring. Science & Technologies*, 2022, no. 2 (52), pp. 25–34. (In Russ.) DOI: 10.25714/MNT.2022.52.003
61. Zirnig W., Hausmann D., Schreier G. High-resolution remote sensing used to monitor natural gas pipelines. *Earth Observation Magazine*, 2002, no. 11, pp. 12–17.
62. Fukui H., Man D.C., Phan A. Digital Earth: a platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables. *Big Earth Data*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 476–496. DOI: <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1948677>

Information about the authors

Olesya V. Kuptsova, Cand. Sc., Associate Professor, Sakhalin State University, 290, Lenin street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russian Federation; Korsuncevaolesy@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9555-3238>

Vyacheslav A. Melkiy, Dr. Sc., Leading Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 1B, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russian Federation; vamelkiy@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8919-8508>

Alexey A. Verkhoturov, Cand Sc., senior researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 1B, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russian Federation; ussr-91@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3826-7339>

Received: 05.07.2024

Revised: 06.09.2024

Accepted: 19.03.2025