

УДК 528.88:528.77: 551.24

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ ПО ДАННЫМ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК С ЦЕЛЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ (НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА ЧАЙВО-ДЕ-КАСТРИ)

Купцова Олеся Витальевна¹,
Korsuncevaolesy@gmail.com

Мелкий Вячеслав Анатольевич²,
vamelkiy@mail.ru

Верхотуров Алексей Александрович²,
ussr-91@mail.ru

Долгополов Даниил Валентинович³,
d-daniil@yandex.ru

¹ Сахалинский государственный университет и РАН,
Россия, 634008, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290.

² Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

³ ЗАО «Ай Ко»,
Россия, 109004, г. Москва, Большой Дровяной пер., 8, стр. 1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью учета опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации трубопроводов. Российская Федерация занимает второе место в мире по общей протяженности магистральных трубопроводов, на которых иногда возникают аварии в результате негативного воздействия природных и техногенных факторов. Основными опасными геологическими процессами, оказывающими воздействие на трубопроводы, являются смещения в зонах активных разрывных нарушений в земной коре. Диагностика на наличие разломных зон территории, планируемой для строительства линейных сооружений, выявляет потенциально опасные участки, на которые следует обратить пристальное внимание, организовать постоянный мониторинг в местах возможных подвижек грунтовых масс. Исследования из экономических соображений целесообразно проводить с помощью данных дистанционного зондирования Земли, а для обработки данных использовать современные геоинформационные продукты. Мониторинг с помощью дистанционного зондирования позволяет быстро оценить меняющиеся инженерно-геологические условия на территориях, где проложен трубопровод, а также обнаружить признаки возникновения природных процессов, представляющих опасность для объектов инфраструктуры. Мониторинг коридоров трасс магистральных трубопроводов необходимо проводить всеми доступными средствами во время строительства и эксплуатации. Работа с программным обеспечением ArcGIS, QGIS и LEFA в сочетании с геофизическими данными, предоставляемыми «Единой геофизической службой РАН», позволяют оценить сейсмическую активность, её интенсивность и характер взаимосвязи с разрывными нарушениями.

Цель: определить и показать на карте наиболее опасные участки с активными разломными зонами, представляющими потенциальную угрозу негативного воздействия на трубопровод во время эксплуатации.

Объект: космические снимки коридора трассы магистрального трубопровода для выявления разрывных нарушений сейсмогенного характера, карты эпицентров землетрясений, выявленных ранее вблизи трассы трубопровода.

Методы: дешифрирование спутниковых изображений, методы геоинформационного моделирования, картографирования, статистические методы, методы автоматизированного линейного анализа, методы для изменения разрешения, размера и обзорности снимков без потери качества информации, такие как методы интерполяции и агрегирования, пространственный анализ взаимозависимости зон разрывных нарушений и землетрясений, компиляция геоинформации.

Результаты. Проведен анализ геологической, геофизической и спутниковой информации исследуемой территории; обработка данных дистанционного зондирования территории, на которой расположен интересующий участок трубопровода; автоматизированный линейный анализ изображений различного спектрального диапазона и разрешения с целью выявления наиболее вероятных зон разрывных нарушений; оценка сейсмической активности исследуемой территории на основе геофизических данных. Определены и представлены на карте потенциально опасные районы исследуемой территории магистрального трубопровода, характеризующиеся зонами разрывных нарушений и повышенной сейсмической активностью.

Ключевые слова:

Мониторинг земель, космические снимки, трубопроводная система, землетрясение, разломы, риск, геоинформационное картографирование, геодезическая привязка, QGIS, LEFA.

Введение

Большое геополитическое значение для России имеет освоение дальневосточной окраины: этому процессу всегда уделялось значительное внимание.

Освоение новых месторождений углеводородного сырья выдвигает в число первоочередных стратегических задач развитие сети магистральных трубопроводов в районах Сибири и Дальнего Востока. Обеспечение безопасности при строительных работах и экс-

платации линейной части трубопроводов требует их регулярного обследования и разработки методов моделирования взаимодействия трубопровода и геологических процессов. К серьёзным экологическим и технологическим последствиям, а также экономическим потерям могут привести выходы из строя оборудования или повреждения трубопровода, вызванные природными процессами или технологическими сбоями.

Выполнение мониторинга геологических условий территории, по которой прокладывают трубопроводы, традиционно основывается на обычных полевых геологических и геодезических измерениях. Традиционные методы являются достаточно высокоточными, однако они охватывают сравнительно небольшую площадь, требуют привлечения существенных трудовых и финансовых ресурсов. Космические методы обладают преимуществами, главными из которых являются целостное представление о территории исследований, возможность получения информации об изменениях природных условий на труднодоступных участках трубопроводов, оперативность и актуальность поступления данных, а также возможность фиксации явлений и процессов, недоступных для исследования другими методами или требующих больших временных и трудовых затрат. Дистанционное зондирование позволяет обнаруживать активизацию зон разрывных нарушений, представляющих опасность для трубопроводных систем, и осуществлять количественную и качественную оценку риска. Методы дешифрирования космических снимков территорий с магистральными трубопроводами, а также вопросы моделирования воздействий природных процессов на трубопроводные системы рассматриваются в статьях В.Г. Аковецкого, В.Г. Бондура, А.Т. Зверева, А.П. Карпика, В.А. Малинникова, В.А. Мелкого, А.В. Комиссарова, В.С. Хорошилова, Д.В. Долгополова, L.F. Balogun, A.S. Galakhar, E. Mercante, W. Zirrig, G. Schreier, W.E. Roper и др. [1–15].

Блоки земной коры в геодинамически активных структурных зонах нередко смещаются относительно друг друга. В зоне, приближенной к плоскости контакта, наблюдается активизация разломов, внешние ее проявления наблюдаются на поверхности территории. В таких условиях часто наблюдается поднятие или проседание грунта, что может происходить в непосредственной близости или при пересечении разломной зоной участков трубопроводов. Смещения грунта даже на несколько сантиметров могут представлять большую опасность для трубопроводов. Увеличение внешней нагрузки на конструкцию трубы может привести к повреждению целостности трубопровода с утечкой нефтепродуктов. Общая цель наблюдений на исследуемом участке трубопровода сводится в количественной оценке смещений в зоне разрывных нарушений. Благодаря мониторингу получают данные для оценки геологической опасности для трасс трубопроводов, которая дает возможность спланировать мероприятия для минимизации риска при негативных воздействиях на трубу. Определение

величины и скорости смещений по разлому, вызывающих деформации трубы, необходимо проводить по данным высокоточных измерений, которые могут производиться как традиционными геодезическими методами, так и с использованием данных интерферометрического радара с постоянным рассеянием и синтезированной апертурой (PS-InSAR). Результаты вычислений позволяют дать точную оценку геологических опасностей и определить комплекс превентивных мер для обеспечения безопасной эксплуатации трасс нефте- и газопроводов [16].

Объектом настоящих исследований послужили космические снимки коридора трассы магистрального трубопровода и цифровые модели рельефа SRTM, которые использовались для выявления разрывных нарушений сейсмогенного характера с помощью линеаментного анализа, карты местоположения эпицентров землетрясений, выявленных ранее вблизи трассы трубопровода.

Предмет исследования – методика дешифрирования с помощью линеаментного анализа. Статистическая обработка линеаментов исследуемой территории проводилась на основе выявления преобладающих направлений штрихов и линеаментов. В результате проведенного анализа выявлены дизъюнктивные нарушения исследуемой территории, по которой проложен трубопровод и построена карта разломов.

Материалы и методы исследования

Для проведения линеаментного анализа были выбраны снимки, полученные в результате съемок со спутника Landsat-8, и данные Shuttle Radar Topography Mission SRTM. Исходные данные получены с вебсайта Геологической службы США, где они размещены в свободном доступе [17].

Данные радарной топографической модели SRTM получены благодаря съемкам, которые были выполнены при реализации проекта по сбору данных в феврале 2000 г. На космическом корабле Endeavour для выполнения съемки были установлены две радиолокационные антенны SIR-C/X-SAR и X-Band Synthetic Aperture Radar. Более крупного сооружения в космосе пока ещё не было: длина антенны составляла 60 м. Различие во времени поступления сигналов на разные антенны позволило с применением фазово-когерентных датчиков получить большое количество высокоточной информации о рельефе земной поверхности. В результате обработки и редактирования первых данных получена модель SRTM Void Filled с разрешением 1–3 угловых секунды, что соответствует разрешению от 30 до 90 м. Точность высоты в модели составляет 1 м. Информация в модели представлена в виде данных о высотном отклонении точек земной поверхности относительно эллипсоида WGS84 [18].

Данные космических съемок Landsat-8 и SRTM скачивались с вебсайта в формате GeoTIFF (TIFF с географической привязкой). Данные снимка Landsat 8 содержат три дополнительных атрибутивных файла, несущих информационную нагрузку о поверхностных, атмосферных и сенсорных характеристиках [19]. Первый уровень обработки снимка включает в себя

оценку точности позиционирования, влияния отражения электромагнитных волн от поверхности Земли (LaSRC), данные об отражательной способности поверхности, рассеивающей способности атмосферы [20]. Последующая обработка проводилась непосредственно перед началом дешифрирования.

Линеamentный анализ выполнялся с помощью программного комплекса LEFA [21]. Работа с данными SRTM и Landsat позволила выявить дизъюнктивные нарушения исследуемой территории. Изображения поверхности обрабатывались с помощью операции бинарно-морфологической эрозии для детектирования границ, а также посредством выполнения действий по математическим алгоритмам Кэнни с дальнейшими преобразованиями Хафа [22].

Основной операцией выделения границ в математической морфологии была эрозия. Объекты изображения представлены в виде множества A всех фоновых точек-пикселей. Для того чтобы выделить необходимые объекты обрабатываемого изображения, используется структурный элемент B , описывающий область определенной формы, которую следует выявлять. Эрозия обрабатываемого изображения A по структурному элементу B – это множество всех точек z , при попадании в которые элемент B полностью содержится в множестве A .

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

где $A \in Z^2$, $B \in Z$ [23, 24].

В результате эрозии на изображении удаляются все граничные точки, имеющие не менее одного фонового пикселя в своем окружении. Границу на изображении определяют путем вычитания из исходного изображения площади, полученной в результате эрозии.

Дальнейшая обработка изображения в программе PyLEFA выполняется посредством преобразований Хафа, что позволяет представить линейные элементы рельефа в виде штрихов. Трансформация Хафа предназначена для упрощения группировки граничных точек в наборы с определенными параметрами. Прямую можно задать либо уравнением $y = kx + b$, либо в виде

$$y = \left(-\frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right)x + \left(\frac{r}{\sin \theta}\right).$$

Через любую точку на плоскости может проходить бесконечно много прямых. Так, для точки с координатами (x_0, y_0) это будут прямые, описываемые уравнением

$$r(\theta) = x_0 \times \cos \theta + y_0 \times \sin \theta,$$

где r – расстояние от начала координат до ближайшей точки на прямой; θ – угол между осью x и линией, соединяющей начало координат с ближайшей точкой.

Ряд точек, которые формируют прямую линию, определяют синусоиды, которые пересекаются в точке параметров (r_0, θ_0) для этой линии. Поэтому обнаружение коллинеарных точек сводится к обнаружению пересекающихся кривых. На изображении, выстроенном в полярных координатах, достаточно выбрать наиболее крупные пятна для обнаружения соответствующих прямых [25, 26].

Пространственно-ориентированную информацию целесообразно аккумулировать и обрабатывать, создавая геопространственные модели с помощью геоинформационных технологий [27–29]. Структура информации в системах, создаваемых с применением методологии Digital Earth, может опираться на современные представления о географической дифференциации природной среды [30–34]. Достаточно эффективными для обработки данных аэрокосмических съемок являются комплексы программного обеспечения ArcGIS и QGIS. Работа с данными во время исследований проводилась в геоинформационном проекте, созданном для территории Северного Сахалина.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования проводились на участке магистрального газопровода Чайво–Де-Кастри, который изучался также нами ранее [35]. Территорию Северного Сахалина, по которой проходит участок трубопровода, пересекают многочисленные разломы [36–39], к которым зачастую приурочены проявления опасных геологических процессов. Смещения по разлому сопровождаются землетрясениями, которые происходят в местах, где превышен предел прочности пород и происходит разрядка накопленных напряжений [40, 41]. Землетрясения в зонах разрывных нарушений вызывают триггерные эффекты, которые способствуют активизации гравитационных склоновых процессов, что приводит к разрушениям объектов промышленного, гражданского строительства и транспортных линейных сооружений, в том числе трубопроводов [42–44].

Анализ геологических условий территории, по которой проходит трубопровод Чайво–Де-Кастри, выполненный с помощью методов геоинформационного моделирования, показал возможность обнаружения проявлений разрывной и трещинной тектоники, способной влиять на процессы строительства и эксплуатации трубопроводов, по данным аэрокосмических съемок. Использование методики линеamentного анализа спутниковых изображений, хорошо зарекомендовавшей себя ранее [45–47], позволило выявить зоны разломов, которые не были обнаружены ранее другими методами.

Анализ данных SRTM посредством операции бинарно-морфологической эрозии и с помощью математических алгоритмов Кэнни с дальнейшей цифровой обработкой посредством преобразований Хафа позволил обнаружить дизъюнктивные нарушения на территории Северного Сахалина (рис. 1).

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 распространена диагональная система, а в подвижных поясах – по простиранию тектонических структур [48]. В зависимости от уровня генерализации изображения зоны разломов относят к различному уровню значимости: планетарному (трансрегиональному), региональному, субрегиональному и локальному [49].

Разрывные нарушения различного масштаба и разломы относят к определенному рангу в зависимости от протяженности: 1 ранг – от нескольких до сотни метров, 2 ранг – от сотни метров до километра, 3 ранг – от 1 до 35 км, 4 ранг – от 35 до 100 км, 5 ранг – более 100 км [50].

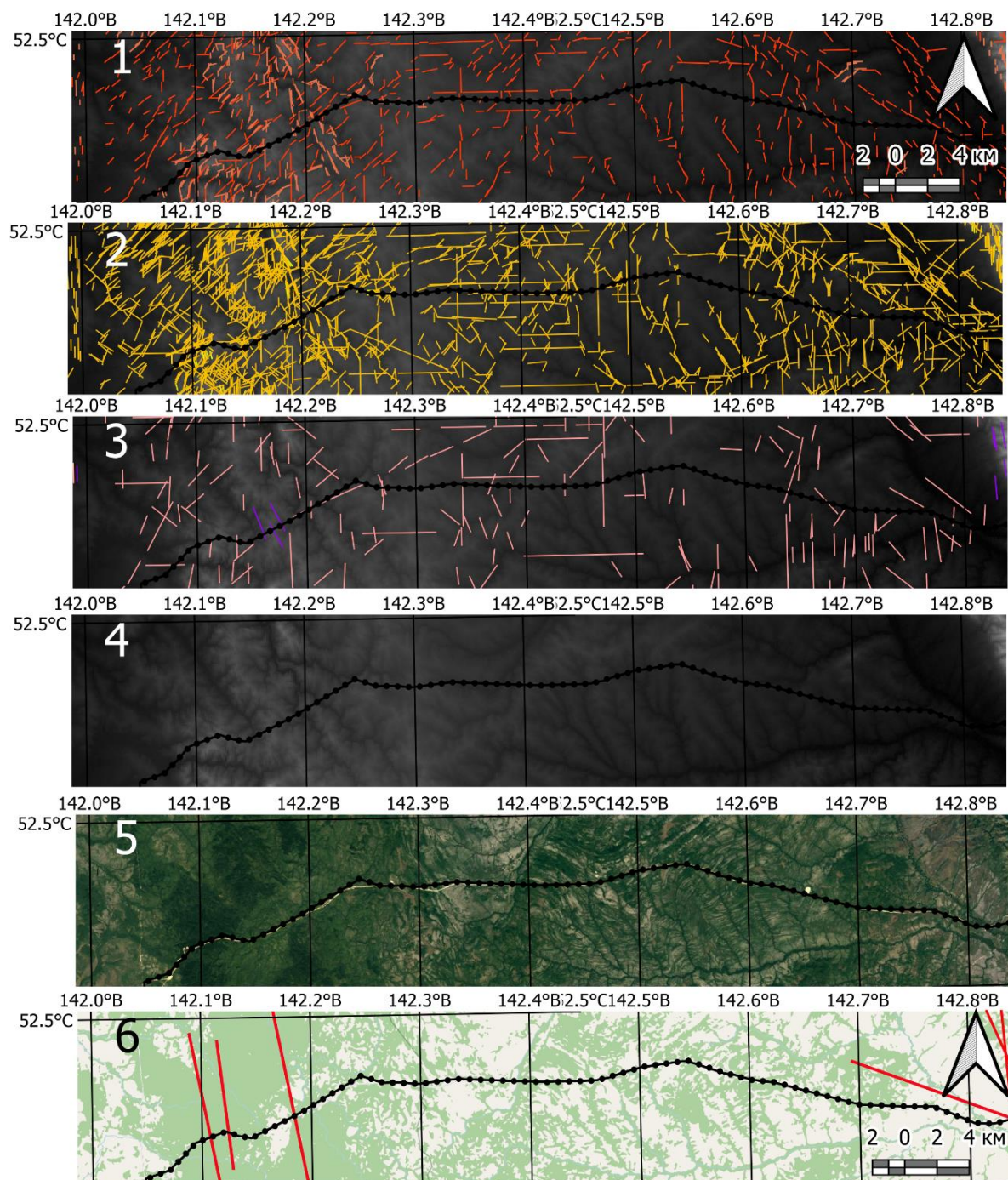


Рис. 1. Разрывные нарушения, выявленные при помощи линейментного анализа на севере Сахалина, в районе расположения магистрального трубопровода Чайво–Де-Кастри при использовании различных алгоритмов: 1 – Erosion many; Canny many; 2 – Erosion medium; Canny medium; 3 – Erosion small; Canny small; 4 – данные SRTM; 5 – данные Google Satellite Hybrid по материалам съемки Landsat; 6 – участок трубопровода с выделенными разломами

Fig. 1. Faults identified by lineament analysis in the north of Sakhalin, in the area of the Chayvo–De-Kastri main pipeline using various algorithms: 1 – Erosion many; Canny many; 2 – Erosion medium; Canny medium; 3 – Erosion small; Canny small; 4 – SRTM data; 5 – Google Satellite Hybrid data based on Landsat survey data; 6 – section of the pipeline with marked faults

Автоматизированное дешифрирование изображений территории, по которой проходит трубопровод, позволило определить местоположение дизъюнктивных дислокаций (рис. 2).

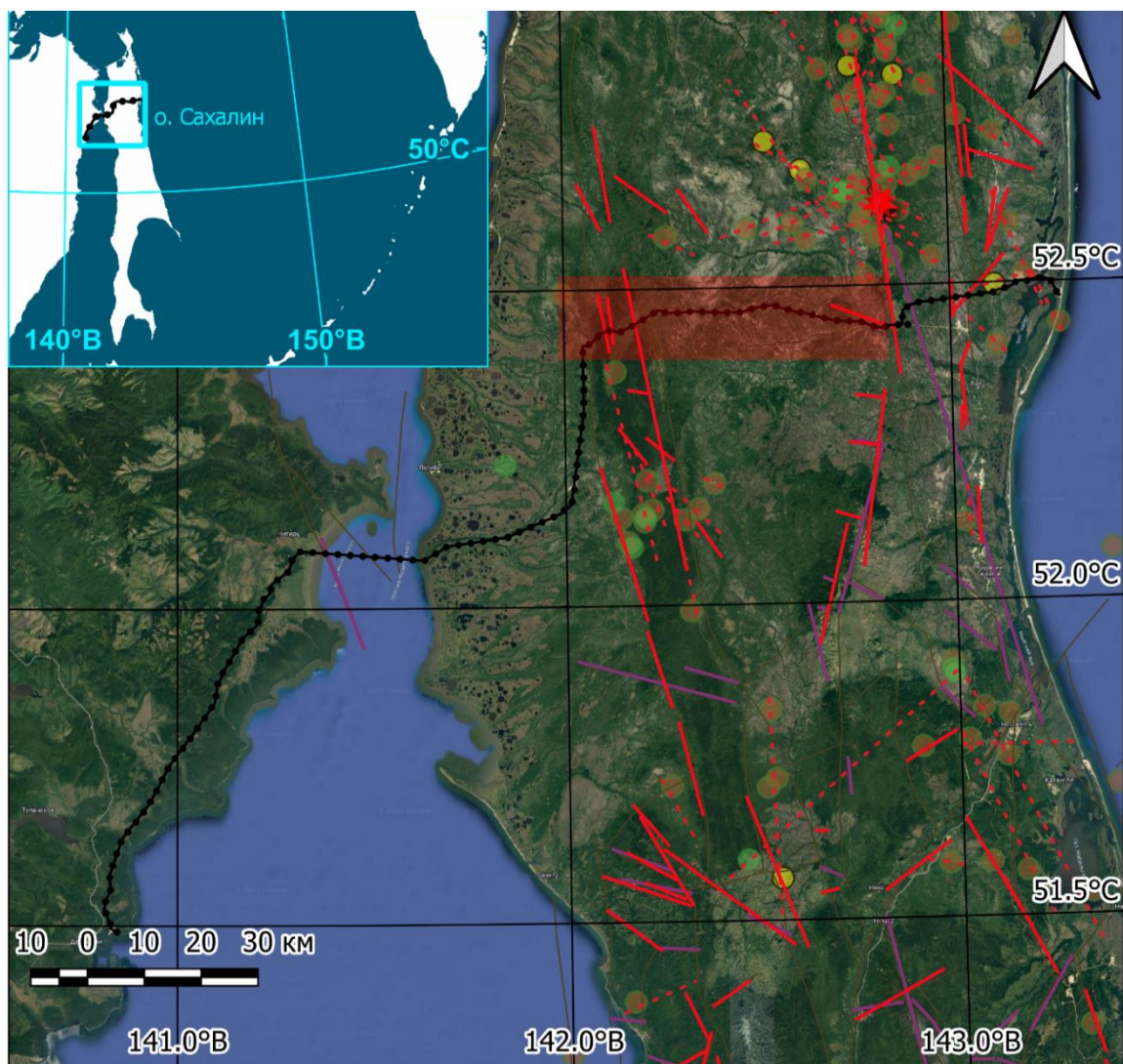


Рис. 2. Схема расположения магистрального трубопровода и разломов, выявленных на исследуемой территории (розовый прямоугольник) по космическим снимкам

Fig. 2. Layout of the main pipeline and the identified faults in the research area (pink rectangle) by space images

Таблица. Разломы исследуемой территории, выделенные в различных режимах программы LEFA с использованием [36, 38, 51–53]

Table. Faults of the research area, identified in various modes of the LEFA program using [36, 38, 51–53]

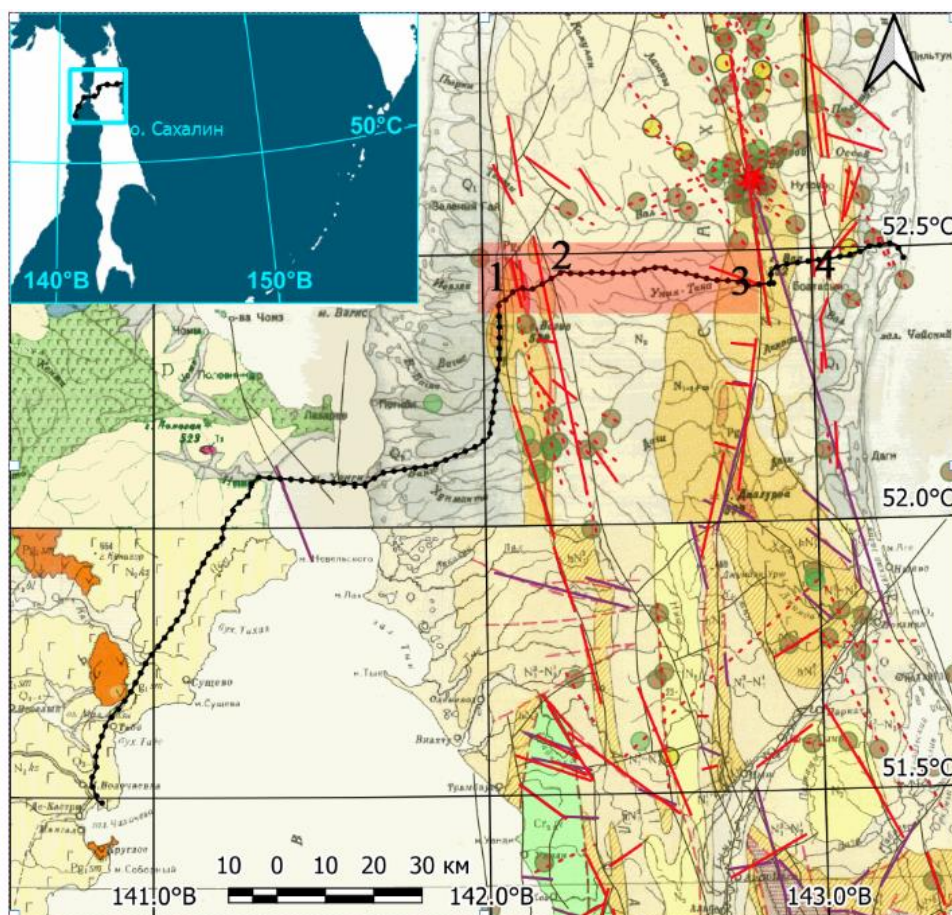
Название разлома Fault name	Режим выделения Selection mode	Другие источники информации о разломе Other sources of information about the fault
Центрально-Сахалинский (Западно-Энгизпальский сегмент) West Sakhalin (West-Engizpal segment)	erosion medium	[38, 52, 53]
Центрально-Сахалинский (Восточно-Энгизпальский сегмент) Central Sakhalin (East-Engizpal segment)	erosion small, medium	[52, 53]
Хоккайдо-Сахалинский (Гыргыляньи-Дагинский сегмент) Hokkaido-Sakhalin (Gyrgylanyi-Dagi segment)	Canny medium	[36, 38, 52, 53]
Эхаби-Паромайский (южная Гаромайская ветвь) Ehabi-Paromaiian (south Garomai branch)	erosion small, Canny many	[36, 38, 51]
Вал-Лангрыйский Val-Langry fault	Canny many	[36, 51]

Большую часть исследуемой территории занимают блоки земной коры Центрально-Сахалинского синклиория, Западно-Сахалинского и Восточно-Сахалинского антиклинориев. При автоматизированном дешифрировании выделены разломные зоны меридионального простирания: Хоккайдо-Сахалинская (Гыргыляньи-Дагинский сегмент), Центрально-Сахалинская, представленная дву-

мя сегментами (Западно-Энгизпальским и Восточно-Энгизпальским), а также Эхаби-Паромайская (южная Гаромайская ветвь) (таблица). Кроме того, на исследуемой территории выделено большое количество локальных разломов 1–3 ранга. Среди них выделяется Вал-Лангрыйский разлом 3 ранга диагонального простирания, ориентированный с северо-запада на юго-восток.

Гряды низкогорных денудационных останцев гор Вагис, которые являются структурным продолжением Западно-Сахалинских гор, ограничены с запада и востока ветвями Центрально-Сахалинского разлома – Западно-Энгизпальским и Восточно-Энгизпальским сегментами. В плане разломные зоны представляют собой ряд субпаралельных нарушений. Видимая ширина зон достигает нескольких сотен метров. Характерными особенностями зон разломов являются большая протяжённость, значительная глубина заложения и длительность развития. Падение плоскости смесителя у Западно-Энгизпальского разлома восточное под углом 70–85 градусов, у Восточно-Энгизпальского – западное под углом 55–70 градусов. Разломы ограничивают узкое протяжённое горстовое поднятие, сложенное более древними породами, чем окружающие.

Гаромайская зона разломов (южное продолжение Эхаби-Паромайской), которая выражена в рельефе грядой складчатых форм шириной около 5 км, включает ряд субмеридиональных разрывов сдвигового типа. Горизонтальные смещения крыльев относительно друг друга после Невтегорского землетрясения были незначительными, так как все пункты наблюдения по обе стороны от разломной зоны сместились на юго-запад на величину около 1 м [52]. Осевая часть гряды положительных форм, а также земная поверхность восточнее разломной зоны поднялись на высоту до 20 см во время землетрясения. Западнее гряды отмечена субмеридиональная зона опусканий на несколько меньшую высоту. На обоих бортах разлома, за исключением разломной зоны шириной 25 м, по данным исследований методом преломленных волн наблюдается субгоризонтальное залегание слоев [52].



Условные обозначения

разломы	землетрясения
— разломы по снимкам	★ mag 7-8
— разломы	● mag 5-5,9
- - - разломы по рельефу и землетрясениям	● mag 4-4,9
— геологическая карта	● mag 3-3,9

Рис. 3. Магистральный трубопровод Чайво-Де-Кастри и зоны разломов на геологической карте. Цветами выделены зоны разломов: черным – отмеченные ранее на геологических картах, фиолетовым – выявленные по данным космических снимков, красным – выявленные по данным SRTM

Fig. 3. The main pipeline Chayvo-De-Kastri and fault zones on the geological map. Fault zones are selected in colors: black – previously marked on geological maps, purple – identified according to satellite imagery, red – identified according to SRTM data

Гыргыляни-Дагинский сегмент Хоккайдо-Сахалинский разломной зоны представлен серией разломов, по которым произошли правосторонние сдвиги пунктов, расположенных на восточном крыле, относительно пунктов западного крыла на 80 см. Смещения по разлому носили взбросо-надвиговый характер. После Нefтегорского землетрясения наблюдался небольшой наклон земной поверхности вдоль разломной зоны к северу около 20 см [52].

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.

Таким образом, системы разломов обусловили сложное складчато-блоковое строение территории, в пределах которой в той или иной степени проявляются черты унаследованности: крупные антиклинальные структуры соответствуют выступам «фундамента», а синклиналильные зоны – понижениям. Однако мощная толща неоген-четвертичных отложений и значительная глубина залегания «фундамента» существенно завуалировали проявления унаследованности у относительно мелких структур. К тому же многие из них, особенно меридионального простирания, образовались гораздо позже и являются наложенными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аковецкий В.Г. Аэрокосмический мониторинг месторождений нефти и газа. – М.: Недра, 2008. – 454 с.
2. Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В., Ильченко А.А. Аэрокосмический мониторинг в задачах оценки геоэкологических рисков аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // Вычислительные технологии. – 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 72–85.
3. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / В.Г. Бондур, В.П. Гаврилов, П.Г. Терещенко и др. / под ред. В.Г. Бондура. – М.: Научный мир, 2012. – 556 с.
4. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазовых территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3–17.
5. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линейментов // Исследования Земли из космоса. – 2005. – № 3. – С. 37–52.
6. Дедкова В.В., Комиссаров А.В. Анализ методов и средств контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25. – № 4. – С. 77–84.
7. Безопасность России. Безопасность трубопроводного транспорта: Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты / под науч. ред. И.И. Мазур, О.М. Иванцова, С.П. Ансова. – М.: МГФ «Знание», 2002. – 750 с.
8. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. – М.: ИЦ Елма, 2004. – 1104 с.
9. Хорошилов В.С., Комиссаров А.В., Кобелев А.Н. Математическое моделирование деформационных процессов основного технологического оборудования камеры приема и пуска средств очистки и диагностики магистрального трубопровода // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 3. – С. 36–43.
10. Хренов Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Аэрокосмические методы и обработка материалов съемок. – М.: Газойл пресс, 2003. – 352 с.
11. Balogun L.F., Matori A.N., Lawal D.U. Geovisualization of subsurface pipelines: a 3D approach // Modern Applied Science – 2011. – V. 5. – № 4. – P. 158–165.

Заключение

Выявление разломов на территории, пересекаемой магистральным трубопроводом Чайво–Де-Кастри с помощью автоматизированного дешифрирования данных космических съемок, позволило получить целостное представление о характере деформаций земной коры на территории исследований. Возможность получения информации об изменениях природных условий на труднодоступных участках трубопроводов, оперативность и актуальность поступления данных, а также возможность фиксации явлений и процессов, недоступных для исследования другими методами или требующих больших временных и трудовых затрат, позволили обнаружить зоны разрывных нарушений, представляющих опасность для трубопроводных систем.

На территории установлены главные региональные разломные зоны меридионального простирания (первого порядка или 5 ранга): Хоккайдо-Сахалинская (Гыргыляни-Дагинский сегмент), Центрально-Сахалинская, представленная двумя сегментами (Западно-Энгизпальским и Восточно-Энгизпальским), а также Эхаби-Паромайская (южная Гаромайская ветвь), которую можно отнести к 4 рангу (таблица). Кроме того, на исследуемой территории выделено большое количество мелких разломов 1–3 ранга.

12. Galakhar A.S. About application of NURBS to monitoring of operational risk of long distance pipelines // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. – 2018. – V. 1141. – № 1. – 012083.
13. Mercante E., Antunes J.F.G. Simulation of a gas pipeline pathway integrating remote sensing data and geographic information systems // Acta Scientiarum. Technology. – 2010. – V. 32. – № 2. – P. 171–178.
14. Roper W.E., Dutta S. Remote sensing and GIS applications for pipeline security assessment // ESRI User Conference Proceedings. Report. – San Diego. URL: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc05/papers/pap1762.pdf> (дата обращения 22.07.2022).
15. Zirmig W., Hausamann D., Schreier G. High-resolution remote sensing used to monitor natural gas pipelines // Earth Observation Magazine. – 2002. – № 11. – P. 12–17.
16. Bayramov E., Buchroithner M.F., Kada M. Radar remote sensing to supplement pipeline surveillance programs through measurements of surface deformations and identification of geohazards // Remote Sensing. – 2020. – V. 23. – № 12. – 3934.
17. Landsat Missions. Website United States Geological Survey (USGS). URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (дата обращения 22.07.2022).
18. 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 22.07.2022).
19. Landsat Quality Assessment ArcGIS Toolbox // United States Geological Survey (USGS) website. URL: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-quality-assessment-arcgis-toolbox> (дата обращения 22.07.2022).
20. 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 // 4th GeoProNH. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 946. – 012003.
21. Шевырев С.Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 138–143.
22. 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 раз-

- вия территории // Материалы Междунар. конф. – М: Географический факультет МГУ, 2021. – Т. 27. – Ч. 1. – С. 317–329.
23. Canny J.F. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – V. 8. – P. 679–698.
24. Xue L.-Y., Pan J.-J. Edge detection combining wavelet transform andanny operator based on fusion rules // IEEE. 2009 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. – 2009. – P. 324–328.
25. Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes // Pattern Recognition. – 1981. – V. 13. – № 2. – P. 111–122.
26. Кудрина М.А. Использование преобразования Хафа для обнаружения прямых линий и окружностей на изображении // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 4 (2). – С. 476–478.
27. Долгополов Д.В. Теоретические основы информационного обеспечения эксплуатации магистральных трубопроводов аэрокосмической информацией // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2 (52). – С. 60–64.
28. Карпик А.П., Жарников В.Б. О взаимодействии наук о Земле в развитии нефтегазового комплекса страны // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27. – № 2. – С. 173–183.
29. Сизов А.П. Локальный мониторинг земель в регионе как инструмент управления земельными ресурсами и сохранения средоформирующего потенциала территории // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2021. – № 4 (168). – С. 43–49.
30. Карпик А.П., Мусихин И.А., Ветошкин Д.Н. Интеллектуальные информационные модели территорий как эффективный инструмент пространственного и экономического развития // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 2. – С. 155–163.
31. Геоинформационная поддержка принятия решений по использованию энергетических ресурсов Сахалина / В.А. Мелкий, И.Н. Тикунова, Е.Н. Ерёмченко, О.Ю. Черешня, Х. Фукуи, С. Марта, Я. Тахджана // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2017. – Т. 23. – № 3. – С. 132–143.
32. Геосистемы Дальнего Востока России на рубеже XX–XXI веков: в 3-х т. / под ред. академика П.Я. Бакланова. Т. 1. Природные геосистемы и их компоненты. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 428 с.
33. 3D geodynamic models for the development of opposing continental subduction zones: The Hindu Kush-Pamir example // J. Liao, T. Gerya, M. Thielmann, A.A.G. Webb, S.-K. Kufner, A. Yin // Earth and Planetary Science Letters. – 2017. – V. 480. – P. 133–146.
34. 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. – V. 5. – № 4. – P. 476–496.
35. Долгополов Д.В., Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Геоинформационное обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 52–63.
36. Деформации земной поверхности в эпицентральной зоне Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. / Н.Ф. Василенко, А.И. Иващенко, Ким Чун Ун, М. Касахара, Х. Такахаси, Ф. Кимата // Динамика очаговых зон и прогнозирование сильных землетрясений северо-запада Тихого океана / отв. ред. А.И. Иващенко. – Южно-Сахалинск: ИМГиТ ДВО РАН, 2001. – Т. 1. – С. 39–57.
37. Купцова О.В., Верхотуров А.А., Мелкий В.А. Выявление зон дизъюнктивных дислокаций для территории Северного Сахалина по данным космических съемок // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 4. – № 1. – С. 79–85.
38. Патрикеев В.Н., Ломтев В.Л. Разломы Северного Сахалина: особенности строения и сейсмическая опасность // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2016. – № 3. – С. 44–58.
39. 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. – V. 109. – № 2. – P. 294–301
40. Experimental study of observable deformation process in fault meta-instability state before earthquake generation / Y. Guo, Y. Zhuo, P. Liu, Sh. Chen, J. Ma // Geodynamics & Tectonophysics. – 2020. – V. 11. – № 2. – P. 417–430.
41. Rupture propagation along Steppovers of strike-slip faults: effects of initial stress and fault geometry / H. Wang, M. Liu, B. Duan, J. Cao // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2020. – V. 110. – № 3. – P. 1011–1024. URL: <https://doi.org/10.1785/0120190233> (дата обращения 22.07.2022).
42. Landslides triggered by the 2004 Niigata Ken Chuetsu, Japan, Earthquake / D.S. Kieffer, R. Jibson, E.M. Rathje, K.I. Kelson // Earthquake Spectra. – 2006. – V. 22 (S 1). – P. 47–73.
43. Fan X., Xu O., Scaringi G. Brief communication: post-seismic landslides, the tough lesson of a catastrophe // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2018. – V. 18. – P. 397–403. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-397-2018> (дата обращения 22.07.2022).
44. Зверев А.Т., Малинников В.А., Ареллано-Баеса А. Изучение динамики линейментов, вызванных землетрясениями в Южной Америке, с применением линейментного анализа данных спутника ASTER (TERRA) // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 5. – С. 56–65.
45. Hobbs W.N. Liniaments at the Atlantic border region // Geological Society of America Bulletin. – 1904. – V. 15. – P. 483–506.
46. Sonder R.A. Die Liniament tektonik und ihre Probleme // Eclogae Geologicae Helveticae. – 1938. – V. 31. – № 1. – P. 199–238.
47. Zlatopolsky A.A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Computers & Geosciences. – 1997. – V. 23. – № 1. – P. 45–62.
48. Рогожин Е.А. Блоковое строение земной коры Северной Евразии // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 81–94.
49. 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.
50. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линейментной тектоники. – М.: Недра, 1986. – 144 с.
51. Активные разломы Сахалина / Р.Ф. Булгаков, А.И. Иващенко, Ч.У. Ким, К.Ф. Сергеев, М.И. Стрельцов, А.И. Кожурин, В.М. Бесстрашнов, А.Л. Стром, Я. Сузуки, Х. Цунуми, М. Ватанабе, Т. Уеки, Т. Шимамото, К. Окумура, Х. Гото, Я. Кария // Геотектоника. – 2002. – Т. 36. – № 3. – С. 227–246.
52. Ломтев В.Л., Жердева О.А. К сейсмотектонике Сахалина: новые подходы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2015. – № 3. – С. 56–68.
53. Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. Разломы Сахалина // Тихоокеанская геология. – 1984. – № 2. – С. 77–86.

Поступила 06.09.2022 г.

Прошла рецензирование: 16.01.2023 г.

Информация об авторах

Купцова О.В., кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли Сахалинского государственного университета и РАН.

Мелкий В.А., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Верхотуров А.А., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Долгополов Д.В., кандидат технических наук, начальник отдела управления проектами Департамента прикладных систем, ЗАО «Ай Ко».

UDC 528.88:528.77:551.24

FAULT MAPPING BY DATA OF AEROSPACE SURVEYS TO ENSURE THE SAFETY OF MAIN PIPELINES (FOR EXAMPLE OF THE SECTION CHAYVO-DE-KASTRI PIPELINE)

Olesya V. Kuptsova¹,
Korsuncevaolesy@gmail.com

Vyacheslav A. Melkiy²,
vamelkiy@mail.ru

Alexey A. Verkhoturov²,
ussr-91@mail.ru

Daniil V. Dolgopolov³,
d-daniil@yandex.ru

¹ Sakhalin State University,
290, Lenin street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia.

² Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science,
1b, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia.

³ CJSC «Ai Co»,
bld. 1, 8, Bolshoy Drovyanoy lane, Moscow, 109004, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to identify the hazardous geological processes during the construction and operation of pipelines. The Russian Federation ranks second in the world in terms of the total length of main pipelines, where accidents sometimes occur as result of the negative impact of natural and man-made factors. The main hazardous geological processes affecting pipelines are displacements in zones of active faults in the earth's crust. Diagnostics of the presence of fault zones in the territory planned for the construction of linear structures makes it possible to identify potentially dangerous areas that should be paid close attention, and to organize constant monitoring in places of possible movements of soil masses. Based on economic considerations, it is advisable to conduct research using Earth remote sensing data, and modern geoinformation products for data processing. Monitoring using remote sensing allows you to quickly assess the changing engineering and geological conditions in the areas where the pipeline is laid, as well as detect signs of the occurrence of natural processes that pose danger to infrastructure facilities. Monitoring of corridors of main pipeline routes must be carried out by all available means during construction and operation. The use of ArcGIS, QGIS and LEFA software in combination with geophysical data provided by the Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences makes it possible to assess seismic activity, its intensity and the nature of the relationship with faults.

The main aim of the research is to identify and show on the map the most dangerous areas with active fault zones, that pose a potential threat of negative impact on the pipeline during operation.

Objects: space images of the corridor of the main pipeline route to identify ruptures of a seismogenic nature, maps of earthquake epicenters previously identified near the pipeline route.

Methods: interpretation of satellite images, methods of geoinformation modeling, mapping, statistical methods, methods of automated lineament analysis, methods for changing the resolution, size and visibility of images without loss of information quality, such as interpolation and aggregation methods, spatial analysis of the interdependence of fault zones and earthquakes, compilation of geoinformation.

Results. The analysis of geological, geophysical and satellite information about the territory where the pipeline was laid was carried out in order to identify fault zones. Automated lineament analysis of images in different spectral ranges and with different spatial resolution made it possible to identify the most probable fault zones. The seismic activity of the study area was estimated on the basis of geophysical data. Potentially dangerous sections of the study area, along which the main pipeline is laid, are identified and presented on the map, characterized by the presence of fault zones and increased seismic activity.

Key words:

Land monitoring, satellite imagery, pipeline system, earthquake, faults, risk, geoinformation mapping, geodetic referencing, QGIS, LEFA

REFERENCES

1. Akovetsky V.G. *Aerokosmicheskiy monitoring mestorozhdeniy nefii i gaza* [Aerospace monitoring of oil and gas fields]. Moscow, Nedra Publ., 2008. 454 p.
2. Akovetsky V.G., Afanasiev A.V., Ilchenko A.A. Aerospace monitoring in the problems for assessment of geocological risks for accidental spills of oil and petroleum products. *Computational technologies*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 72–85. In Rus.
3. Bondur V.G., Gavrilov V.P., Tereshchenko P.G. *Aerokosmicheskiy monitoring obektoy neftegazovogo kompleksa* [Aerospace monitoring of oil and gas facilities]. Ed. by V.G. Bandur. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2012. 556 p.
4. Bondur V.G. Aerospace methods and technologies for monitoring of oil and gas areas and facilities. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2010, no. 6, pp. 3–17. In Rus.
5. Bondur V.G., Zverev A.T. A method of earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2015, no. 3, pp. 37–52. In Rus.
6. Dedkova V.V., Komissarov A.V. Analysis of methods and means of control of main pipelines' protective structures. *Vestnik SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 77–84. In Rus.
7. *Bezopasnost Rossii. Bezopasnost truboprovodnogo transporta: pravovye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty* [Russian security. Pipeline transport safety: legal, socio-

- economic, scientific and technical aspects]. Eds. I.I. Mazur, O.M. Ivantsov, S.P. Ansov. Moscow, MGF Znanie Publ., 2002. 750 p.
8. Mazur I.I., Ivantsov O.M. *Bezopasnost truboprovodnykh sistem* [Safety of pipeline systems]. Moscow, ITs ELIMA Publ., 2004. 1104 p.
 9. Khoroshilov V.S., Komissarov A.V., Kobelev N.N. Mathematical modeling of deformation processes of the main technological equipment of the chamber receiving and starting the cleaning and diagnostic means (PPS SOD) of the main pipeline. *Vestnik SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2021, vol. 26, no. 3, pp. 36–43. In Rus.
 10. Khrenov N.N. *Osnovy kompleksnoy diagnostiki severnykh truboprovodov. Aerokosmicheskie metody i obrabotka materialov semok* [Fundamentals of complex diagnostics of northern pipelines. Aerospace methods and processing of survey materials]. Moscow, Gazoil Press, 2003. 352 p.
 11. Balogun L.F., Matori A.N., Lawal D.U. Geovisualization of subsurface pipelines: a 3D approach. *Modern Applied Science*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 158–165.
 12. Galakhar A.S. About application of NURBS to monitoring of operational risk of long distance pipelines. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2018, vol. 1141, no. 1, 012083.
 13. 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.
 14. Roper W.E., Dutta S. Remote sensing and GIS applications for pipeline security assessment. *ESRI User Conference Proceedings. Report*. San Diego. Available at: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc05/papers/pap1762.pdf> (accessed 22 July 2022).
 15. Zirnig W., Hausamann D., Schreier G. High-resolution remote sensing used to monitor natural gas pipelines. *Earth Observation Magazine*, 2002, no. 11, pp. 12–17.
 16. Bayramov E., Buchroithner M., Kada M. Radar remote sensing to supplement pipeline surveillance programs through measurements of surface deformations and identification of geohazard risks. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 23, 3934.
 17. *Landsat Missions. Website United States Geological Survey (USGS)*. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (accessed 22 July 2022).
 18. 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 22 July 2022).
 19. Landsat quality assessment ArcGIS toolbox. *United States Geological Survey (USGS) website*. Available at: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-quality-assessment-arcgis-toolbox> (accessed 22 July 2022).
 20. 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. *4th GeoProNH. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 946, 012003.
 21. 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 Rus.
 22. Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A., Melkiy V.A. Kartografirovaniye razlomov na territorii Severo-Sakhalinskoy ravniny po dannym distantsionnogo zondirovaniya zemli [Mapping of faults on territory of the North Sakhalin plain by remote sensing data]. *InterCarto. InterGIS. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoychivogo razvitiya territory. Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii* [InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories. Proc. of the International conference]. Moscow, MSU Publ., 2021. Vol. 27, part 1, pp. 317–329.
 23. Canny J.F. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, vol. 8, pp. 679–698.
 24. Xue L., Pan J. Edge detection combining wavelet transform and canny operator based on fusion rules. *2009 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, IEEE, 2009, pp. 324–328.
 25. Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition*, 1981, vol. 13, no. 2, pp. 111–122.
 26. Kudrina M.A. Using Hough transformation for detecting lines and circles in pictures. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 4 (2), pp. 476–478. In Rus.
 27. Dolgopopolov D.V. Theoretical foundations of information support for the operation of main pipelines with aerospace information. *Monitoring. Science and Technology*, 2022, no. 2 (52), pp. 60–64. In Rus.
 28. Karpik A.P., Zharnikov V.B. On the interaction of Earth sciences in the development of the country's oil and gas complex. *Vestnik SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2022, vol. 27, no. 2, pp. 173–183. In Rus.
 29. Sizov A.P. Local land monitoring in the region as a tool for managing land resources and preserving the environmental potential of the territory. *Use and protection of natural resources in Russia*, 2021, no. 4 (168), pp. 43–49. In Rus.
 30. Karpik A.P., Musikhin I.A., Vetoshkin D.N. Smart information models as an effective tool of regional spatial and economic development. *Vestnik SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 155–163. In Rus.
 31. Melkiy V.A., Tikunova I.N., Eremchenko E.N., Cheresnyha O.Yu., Fukuy H., Marta S., Takhdzhana Y. Geoinformation support for decision-making on the use of energy resources of Sakhalin. *InterCarto. InterGIS*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 132–143. In Rus.
 32. *Geosistemy Dalnego Vostoka Rossii rubezhe XX–XXI vekov: v 3-h t.* [Geosystems of the Russian Far East at the turn of XX–XXI centuries: in 3 vol.]. Ed. by P.Ya. Baklanov. Vol. 1. Natural geosystems and their components. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2008. 428 p.
 33. Liao J., Gerya T., Thielmann M., Webb A.A.G., Kufner S.-K., Yin A. 3D geodynamic models for the development of opposing continental subduction zones: the Hindu Kush-Pamir example. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, vol. 480, pp. 133–146.
 34. Fukuy 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.
 35. Dolgopopolov D.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Geoinformation support for safe operation of pipeline transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 52–63. In Rus.
 36. Vasilenko N.F., Ivashchenko A.I., Kim Chun Un, Kasahara M., Takahashi H., Kimata F. Deformatsii zemnoy poverkhnosti v epitsentralnoy zone Neftegorskogo zemletryaseniya 27 (28) maya 1995 g. [Deformations of the Earth's surface in the epicentral zone of the Neftegorsk earthquake on May 27 (28), 1995]. *Dinamika ochagovykh zon i prognozirovaniye silnykh zemletryasenyi severozapada Tikhogo okeana* [Dynamics of focal zones and prediction of strong earthquakes of the North West Pacific Ocean]. Ed. by A.I. Ivashchenko. Yuzhno-Sakhalinsk, IMGiG FEB RAS Publ., 2001. vol. 1, pp. 39–57.
 37. Kuptsova O.V., Verkhoturov A.A., Melkiy V.A. Identification of zones of disjunctive dislocations for the territory of Northern Sakhalin according to space image data. *Interexpo Geo-Siberia*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 79–85. In Rus.
 38. Patrikeev V.N., Lomtev V.L. Faults of Northern Sakhalin: structural features and seismic hazard. *Geology and minerals of the World Ocean*, 2016, no. 3, pp. 44–58. In Rus.
 39. 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. In Japanese.
 40. Guo Y., Zhuo Y., Liu P., Chen Sh., Ma J. Experimental study of observable deformation process in fault meta-instability state before earthquake generation. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 417–430.
 41. Wang H., Liu M., Duan B., Cao J. Rupture propagation along Stepovers of strike-slip faults: effects of initial stress and fault geometry. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, vol. 110, no. 3, pp. 1011–1024. Available at: <https://doi.org/10.1785/0120190233> (accessed 22 July 2022).
 42. Kieffer D.S., Jibson R., Rathje E.M., Kelson K.I. Landslides triggered by the 2004 Niigata Ken Chuetsu, Japan, Earthquake. *Earthquake Spectra*, 2006, vol. 22, no. S 1, pp. 47–73.
 43. Fan X., Xu Q., Scaringi G. Brief communication: post-seismic landslides, the tough lesson of a catastrophe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, vol. 18, pp. 397–403. Available at:

- <https://doi.org/10.5194/nhess-18-397-2018> (accessed 22 July 2022).
44. Zverev A.T., Malinnikov V.A., Arellano-Baesa A. Studying dynamics of lineaments caused by earthquakes in South America, using the lineament analysis of ASTER (TERRA) satellite data. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*, 2005, no. 5, pp. 56–65. In Rus.
 45. Hobbs W.N. Lineaments at the Atlantic border region. *Geological Society of America Bulletin*, 1904, vol. 15, pp. 483–506.
 46. Sonder R.A. Die Liniament tektonik und ihre Probleme [Lineament tectonics and its problem]. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 1938, vol. 31, no. 1, pp. 199–238.
 47. 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.
 48. Rogozhin E.A. Block structure of the Earth's crust of Northern Eurasia. *Physics of the Earth*, 2004, no. 10, pp. 81–94. In Rus.
 49. Bondur V.G., Zverev A.T. Lineament system formation mechanisms registered in space images during the monitoring of seismic danger areas. *Issled. Zemli Kosmosa*, 2007, no. 1, pp. 47–56. In Rus.
 50. Kats Ya.G., Poletaev A.I., Romyantseva E.F. *Osnovy lineamentnoy tektoniki* [Fundamentals of lineament tectonics]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 144 p.
 51. Bulgakov R.F., Ivashchenko A.I., Kim Ch.U., Sergeev K.F., Streltsov M.I., Kozhurin A.I., Besstrashnov V.M., Strom A.L., Suzuki Y., Tsutsumi H., Watanabe M., Ueki T., Shimamoto T., Okumura K., Goto H., Kariya Y. Active faults in Northeastern Sakhalin. *Geotectonics*, 2002, vol. 36, no. 3, pp. 227–246.
 52. Lomtev V.L., Zherdeva O.A. To seismotectonic Sakhalin: new approaches. *Geology and useful minerals of the World Ocean*, 2015, no. 3, pp. 56–68. In Rus.
 53. Kharakhinov V.V., Galtsev-Bezyuk S.D., Tereshchenkov A.A. Fractures of Sakhalin. *Pacific Geology*, 1984, no. 2, pp. 77–86. In Rus.

Received: 6 September 2022.

Reviewed: 16 January 2023.

Information about the authors

Olesya V. Kuptsova, Cand. Sc., associate professor, Sakhalin State University.

Vyacheslav A. Melkiy, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences.

Alexey A. Verkhovurov, Cand Sc., senior researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences.

Daniil V. Dolgopolov, Cand Sc., head of the Project Management Department, CJSC «Ai Co».