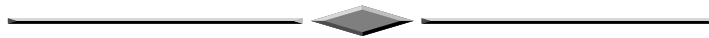


ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ



УДК: 528.8:551.24(571.642)

DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-5-75-85

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗОН РАЗЛОМОВ ТЕРРИТОРИИ ЗАКАЗНИКА «ДОЛИНСКИЙ» (о. САХАЛИН) НА СОСТОЯНИЕ ЕГО РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Олеся Витальевна Купцова

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

Инна Ивановна Лобищева

Сахалинский государственный университет, 693023, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 2, старший преподаватель кафедры геологии и нефтегазового дела, тел. (914)757-99-26, e-mail: slalinna@mail.ru

Алексей Александрович Верхотуров

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования, e-mail: ussr-91@mail.ru

Вячеслав Анатольевич Мелкий

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, e-mail: vamelkiy@mail.ru

Зоны разломов земной коры на территории Сахалина характеризуются высокой геодинамической активностью и в большинстве своем хорошо просматриваются на материалах космических съемок. Поэтому, выделяя на подобных территориях разнообразные растительные сообщества и определяя их состояние по содержанию фитомассы, используя значения вегетационного индекса NDVI, возможно сделать заключение о роли указанных разломов в оценке состояния указанных ценозов и ландшафтов в целом. Цель исследования, в этой связи, состоит в проверке достоверности гипотезы о формировании обильного растительного покрова в пределах разломных зон с использованием анализа материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), обеспечивающих требуемую информационную полноту данных по объему фитомассы различных растительных сообществ. Методы: дешифрирование и анализ данных дистанционного зондирования Земли с Sentinel, Landsat и аппарата «Шаттл» при формировании SRTM, геоинформационное картографирование на платформе ArcGIS. В процессе исследования проанализировано состояние территории заказника «Долинский» (о. Сахалин) по материалам спутниковых съемок Landsat-8, Sentinel-2A, а также данные SRTM. Разломные зоны выявлены с помощью программных комплексов ArcGIS, QGIS и PyLEFA методами линеаментного анализа, классификация растительности осуществлена методом максимального правдоподобия, а ее состояние определено по значениям индекса NDVI, отражающего содержание фитомассы на исследуемом участке. В итоге выявлена достаточная информативность материалов ДЗЗ, продемонстрирована методика их обработки и использования полученных результатов, подтверждена достоверность гипотезы увеличения фитомассы ценозов и адекватных условий их развития, приуроченных к зонам разломов земной коры.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, дешифрирование аэрокосмических изображений, геоинформационное тематическое картографирование, геодинамическая активность, Sentinel, Landsat, SRTM, NDVI, PyLEFA

Введение

Под воздействием внешних и внутренних сил земная кора делится на блоки, которые отделяют друг от друга разломные зоны [1–4]. Горные породы в пределах разломной зоны представлены, как правило, зонами дробления, брекчирования, катаклаза, рассланцевания и милонитизации. С увеличением глубины по разлому увеличивается роль рассланцевания и милонитизации, а также количество оперяющих трещин.

Тектонические брекчии, как правило, сложены меланжем, сцементированным тонко раздробленным или жильным материалом, которые формируются в зонах глубинных разломов. Раздробленные породы обладают хорошей проницаемостью, пористостью и фильтрационной способностью. Такими породами выполняются днища горных котловин и речных долин, приуроченных к разломным зонам и ограниченных ими [5, 6]. Наиболее активное накопление рыхлого материала твердого стока рек происходит при выходе на предгорные равнины. Все поверхности этих геологических образований покрывают почвы с относительно хорошим матриксом. На территориях, прилегающих к разломам, растительные сообщества не похожи на растительный покров остальной территории [7]. Соответственно, в таких территориях наблюдается формирование обильного растительного покрова, отличающегося повышенным содержанием фитомассы, которая, в свою очередь, находит проявление в отражательных способностях земной поверхности, фиксируемых на аэрокосмических изображениях.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов для анализа состояния территории заказника «Долинский» (о. Сахалин) использовались спутниковые снимки Landsat-8, Sentinel-2A, а также данные радарной интерферометрической съемки SRTM, произведенной радиолокационными сенсорами X-SAR и SIR-C с помощью аппарата «Шаттл» [8–10]. Анализ выполнялся с использованием исходных материалов за период с 2018 по 2021 г. Данные спутников Landsat и Sentinel находятся в свободном доступе на различных интер-

нет-ресурсах (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) и (<https://www.sentinel-hub.com/>). Спутниковые снимки отбирались с условием отсутствия облачности над интересующей территорией. Снимки прошли все процедуры первичной обработки.

Снимки подбирались с учетом программы LEFA, в которой анализировались исходные данные. Основные требования для работы в программе – формат изображений *.tif и соответствие разрешения снимка масштабу территории. Дальнейшую обработку по коррекции или изменению размера пиксела провели в ArcGIS. Исходные данные прошли необходимую коррекцию, в том числе и атмосферную. Разрешение исходных данных 30 м соответствует поставленным задачам анализа территории. Изображения были обработаны в программе ArcGIS для выделения необходимого участка с целью детального линейного анализа исследуемой территории.

Цифровая модель рельефа, полученная в результате съемки SRTM, необходима при создании математически определенной модели разрывных нарушений, так как она отображает незначительные уступы в рельефе для их выявления.

Исходные данные обрабатывались в программном обеспечении ArcGIS [11], QGIS [12] и PyLEFA [13]. При работе с изображениями использовались методы математической обработки изображений, в число которых входит метод линейного анализа, линейная обработка операции морфологической эрозии, алгоритмы Кэнни и Хафа, а также метод максимального правдоподобия для классификации растительности [14–20]. Существует множество способов классификации растровых изображений [21, 22].

Выявление разрывных нарушений происходило с учетом особенностей геологического строения региона с помощью выделения линий на изображениях поверхности Земли. Для статистической обработки линейных элементов с помощью роз-диаграммы использовался плагин QGIS Line Direction Histogram.

Обработка изображений в программе LEFA производилась по нескольким алгоритмам, таких как Кэнни, Хафа и операция эрозии. При выборе чувствительности поиска линий для алгоритмов основополагающим является наличие шума на изображении.

Формулы для алгоритма эрозии, применяемого к изображению (A), определяют структурный элемент (B), с помощью которого «убирается» лишнее среди множества (A) точек (z), и определяются линейные границы исходных материалов

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

где $A \in Z^2$; $B \in Z^2$.

Алгоритм Кэнни с помощью матрицы, применяемой к изображению, определяет выбор чувствительности к шуму, ищет градиент снимка, по производной определяет градиент края, после чего использует метод истончения и метод двойного порога для точного определения границ изображения.

Формула алгоритма Хафа описывается линейными параметрами углового коэффициента (k) и свободного члена (b) известного уравнения прямой $y = kx + b$.

Начальным этапом выделения линеаментов является выделение границ изображения по одному из алгоритмов, описанных выше. После обнаружения границ наступает этап выделения штрихов-линеаментов в режимах разной чувствительности к шуму. При малой чувствительности выделяются только сильно выраженные в рельефе линеаменты. При средней и максимальной чувствительности выделяется большее количество штрихов для анализа. После выделения штрихов-линеаментов программа ищет так называемые «вероятностные разломы». Программа считывает длину, количество и направление штрихов-линеаментов,

выраженных в рельефе, производит их анализ и оценку, подбирая наиболее подходящие вероятности линий разломов, к которым могут быть приурочены имеющиеся линии-штрихи модифицированного изображения.

Дешифрирование снимков позволило также оценить состояние почвенно-растительного покрова и геолого-геоморфологические характеристики района исследования. В работе для выделения участков, занятых растительными сообществами в различном состоянии, проведена процедура классификации с последовательным использованием методов классификации без обучения и с обучением. Обучающая выборка по методу максимального правдоподобия составлена из наборов пикселей, соответствующих местам выполнения геоботанических описаний. Процедура «обучения» основывалась на наборе пикселей эталонных участков территорий геоботанических исследований. Статистический анализ изображений позволяет получить свои спектральные характеристики для каждого типа растительного покрова территории [23, 24]. Комбинация спектральных каналов 11-8-4 спутника Sentinel-2A использовалась для разделения растительных формаций, тогда как каналы 4, 7, 8 спутника Landsat-8 для выделения дизъюнктивных нарушений сплошности земной коры. Для изображений исследуемой территории выполнена процедура расчета индекса NDVI.

Для оценки зависимости объемов фитомассы от близости к зонам распространения разломов земной коры в процессе работы разработан алгоритм операций (рис. 1).

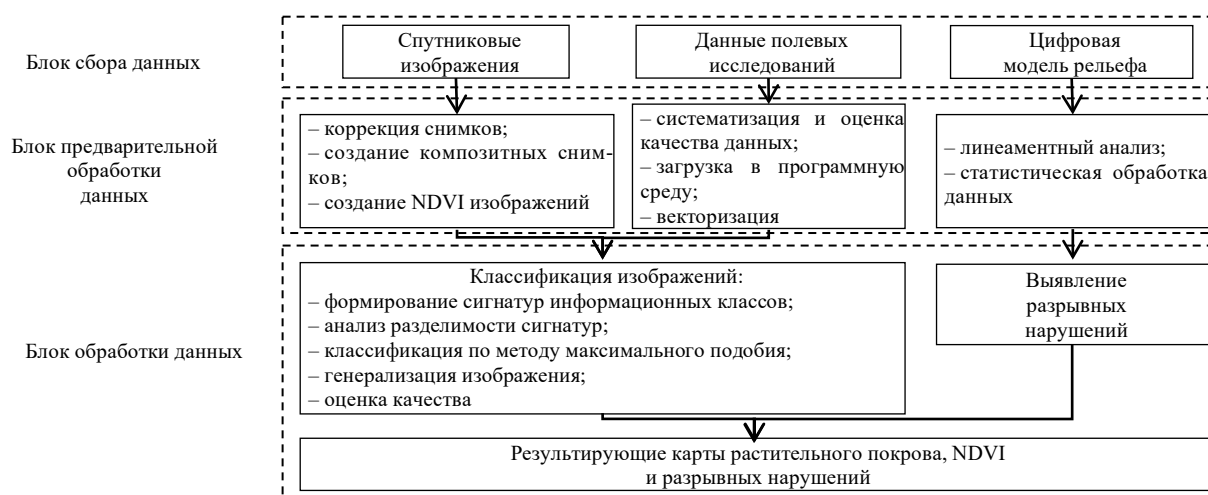


Рис. 1. Технологическая схема дешифрирования при выявлении взаимосвязи между разломными зонами и обилием растительности

Многоуровневый анализ исходных изображений на базе ГИС с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса позволяет выявить особенности растительности и определяющих ее регионального геологического строения исследуемой территории.

Результаты и обсуждение

При обработке исходных спутниковых изображений заказника «Долинский» были выявлены системы линеаментов, характерные для зон повышенной трещиноватости (рис. 2).

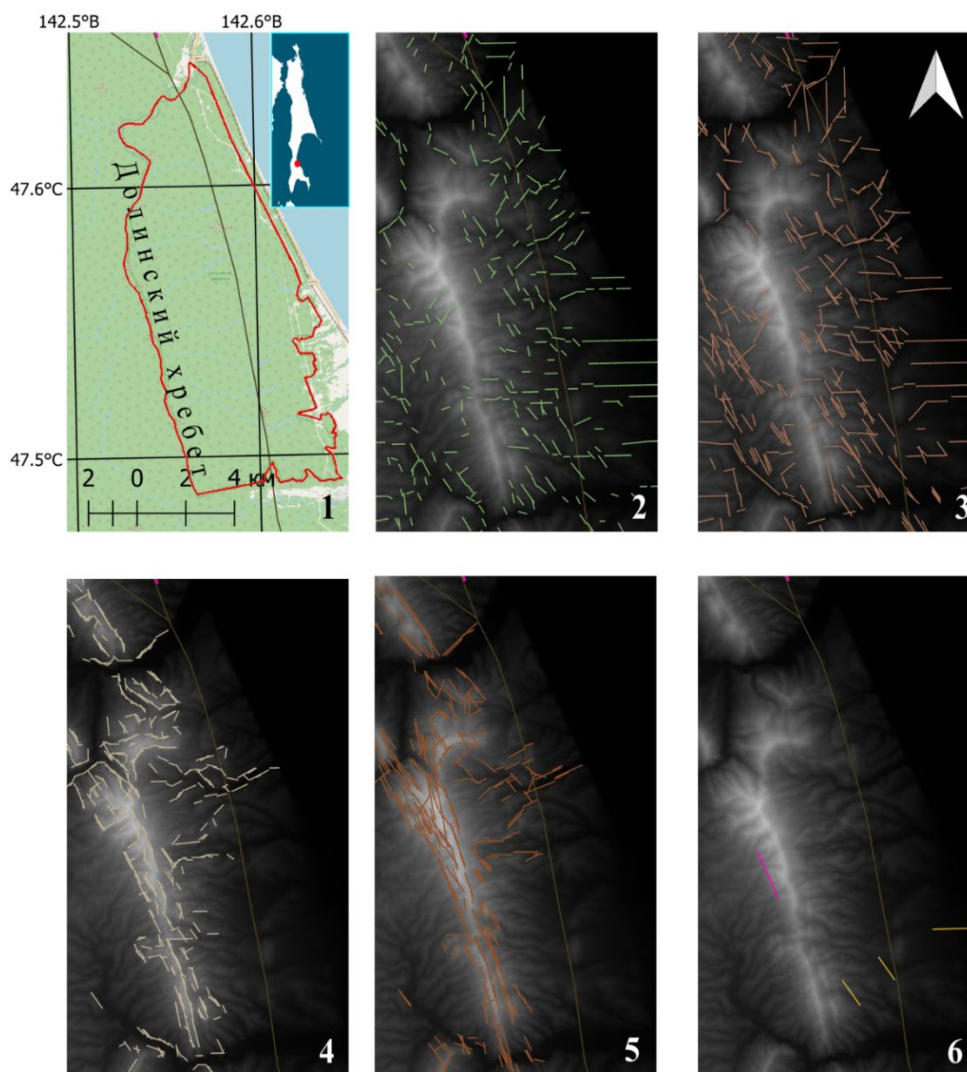


Рис. 2. Фрагменты изображения с линеаментами, выделенными в программе LEFA при использовании различных алгоритмов:

1 – заказник «Долинский» на карте Сахалина; 2 – Erosion many; 3 – Erosion medium; 4 – Canny many; 5 – Canny medium; 6 – Canny small (красные линии); Erosion small (желтые линии)

На изображениях, анализируемых с помощью алгоритма Erosion, линии распределены достаточно равномерно, однако на модифицированном материале, полученном с помощью алгоритма Canny, можно четко определить территориальное местоположение зоны наиболее ярко выраженных линеа-

ментов, которые свидетельствуют о напряженно-деформированном состоянии земной поверхности. Результаты анализа сохраняются в формате shape-файлов с привязкой системы координат исходных изображений, дальнейшая их обработка происходит в ГИС.

Наиболее информативным для исследуемой территории и выбранного масштаба в плане распространения линеаментов является использование алгоритма Canny medium. Другие способы обработки показывают либо очень малое, либо большое количество разломов.

На основе серии космических снимков за летний период времени были подготовлены NDVI-изображения и карты растительного

покрова на территорию заказника «Долинский». Классификация «с обучением» методом максимального правдоподобия космических снимков Sentinel-2A с помощью инструментария ПО ArcMap позволила выделить семь типов растительных сообществ, в том числе пихтово-еловые леса, ивово-ольховые долинные леса и посадки хвойных культур сосны и лиственницы (рис. 3).

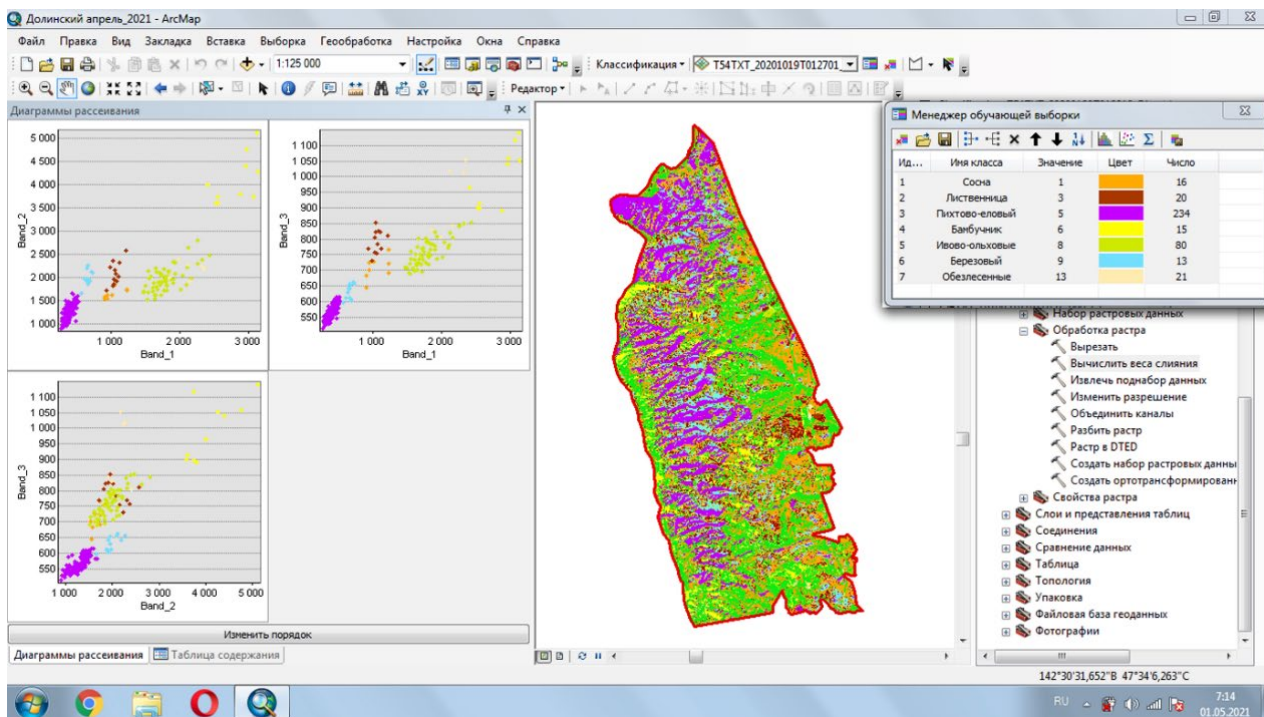


Рис. 3. Классификация изображения территории заказника в ArcMap

Результирующие карты, полученные в результате обработки информации о местоположении разломов и состоянии растительности, позволяют судить о характере взаимообусловленности значений фитомассы и трещиноватости массивов горных пород в разломных зонах (рис. 4).

На полученной карте можно отметить четкую приуроченность линеаментов к предгорьям Долинского хребта, верховьям и долинам наиболее крупных рек Фирсовки, Рыбной, Лиственницы и Кирпичной. К этой же территории зачастую приурочены высокие значения NDVI, обусловленные высокой продуктивностью пихтово-еловых (I-II класс бонитета) и долинных ивово-ольховых лесов. Увеличение фитомассы наблюдается в зонах распро-

странения разломов земной коры в шлейфе осадочных отложений, примыкающих к восточным склонам Долинского хребта.

Воздействие разломных зон на живые организмы может носить как положительный, так и отрицательный характер. В зонах активных разломов отмечаются высокие концентрации радона. В связи с этим по статистическим данным возрастает число болезней растительности. Значительное количество мутаций, описанное Е. К. Мельниковым, В. А. Рудником и Ю. И. Мусийчуком, привело к увеличению видового разнообразия культурных растений [25].

Смещения в разломных зонах могут быть причиной аварийных ситуаций на объектах промышленности с последующим негатив-

ным воздействием на окружающую среду, жизнь и здоровье людей [25]. Для предотвращения негативных последствий необходимо проведение превентивных исследований, результатом которых должно быть составление специальных геолого-структурных карт мас-

штаба 1 : 100 000 и крупнее с нанесенными на них зонами разломов, дифференцированных по степени опасности, на геодинамически опасных участках, выявленных по результатам анализа полученных материалов, – 1 : 25 000 и крупнее [26–31].

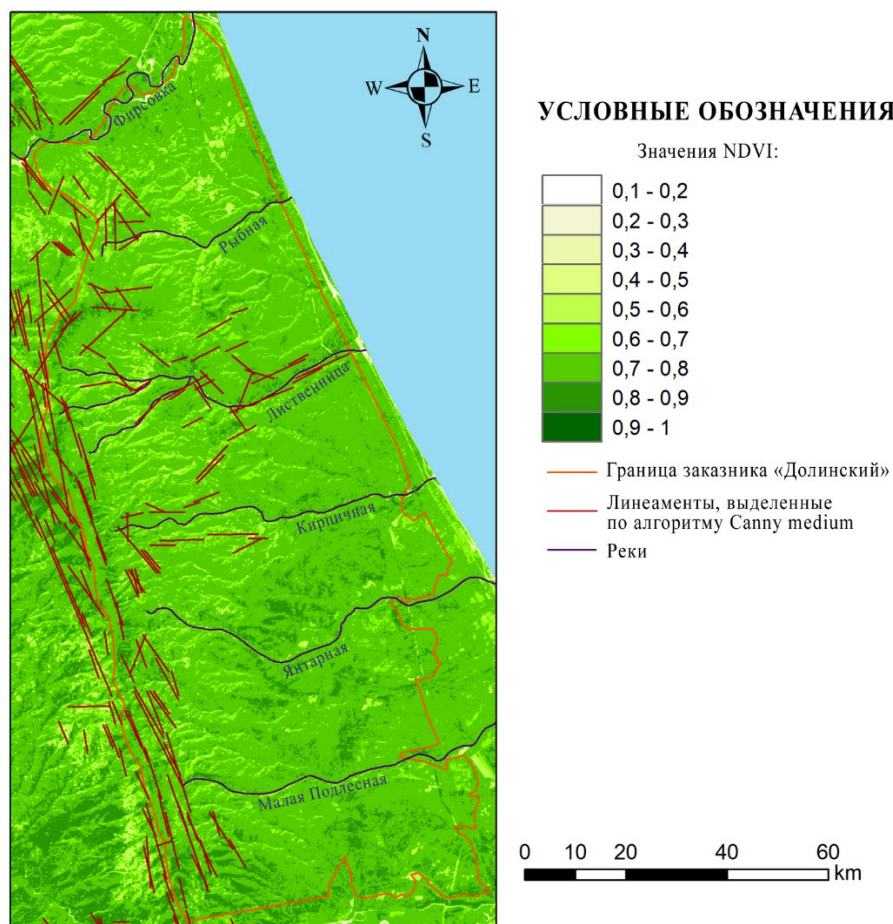


Рис. 4. Результирующая карта взаимообусловленности значений фитомассы и активных разломных зон

Вместе с тем активность разломов определяла разнообразие и биопродуктивность природных ландшафтов, которые наблюдается в шлейфах выноса осадочных отложений у подножия хребтов. Выпадение осадков на склонах способствует увлажнению предгорных равнин малыми водотоками с хребтов.

Заключение

Большинство разломов на Сахалине активно изучалось и ранее при поисках полезных ископаемых, а также после сильных землетрясений, таких, в частности, как Нефте-

горское (1995 г.) и Невельское (2007 г.). Проведенное исследование, результаты которого представлены в настоящей статье, позволило получить и сопоставить высоко информативные разновременные карты линеаментов и фитомассы растительности заказника «Долинский», составленные по данным дистанционного зондирования Земли с использованием авторских разработок. В итоге подтверждена достоверность утверждения о том, что зонах активных разломов формируются ландшафты, благоприятные для развития растительного покрова. Наиболее высокие значения NDVI, обусловленные высокой продук-

тивностью пихтово-еловых (I-II класс бонитета) и долинных ивово-ольховых лесов отмечаются в верховьях долин наиболее крупных рек исследованной территории: Фирсовки, Рыбной, Лиственницы и Кирпичной в восточных предгорьях Долинского хребта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аплонov С. А. Геодинамика. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2001. – 360 с.
2. Короновский Н. В. Общая геология : учебник. – 2-е изд., стереотип. – Москва : ИНФРА-М, 2017. – 474 с.
3. Зверев А. Т. Инженерная геодинамика : учебник для студентов высших учебных заведений. – Москва : Изд-во МИИГАиК, 2013. – 324 с.
4. Парначёв В. П. Основы геодинамического анализа : учебное пособие. – Томск : Изд-во НТЛ, 2011. – 308 с.
5. Трифонов В. Г. Особенности развития активных разломов // Геотектоника. – 1985. – Т. 19, № 2. – С. 16–26.
6. Трифонов В. Г. Живые разломы земной коры // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 7. – С. 66–74.
7. Жмакин Е. Я., Давыдова Е. Г. Разломы земной коры и особенности растительности в зоне их влияния на территории Калужской области // Вестник Калужского университета. – 2010. – № 3. – С. 57–60.
8. USGS EROS Archive. Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey) [Electronic resource]. – Mode of access : <https://glovis.usgs.gov/aP> (accessed 15.06.2021).
9. United States Geological Survey (USGS) [Electronic resource]. – Mode of access : <https://doi.org/earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 15.06.2021).
10. Sentinel Missions. Website ESA (European Space Agency) [Electronic resource]. – Mode of access : <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (accessed 15.06.2021).
11. Ресурсы для ArcMap // ESRI.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-desktop/resources> (дата обращения: 15.06.2021).
12. The QGIS Line Direction Histogram Plugin. Håvard Tveite. Created using Sphinx 1.6.7 [Electronic resource]. – Mode of access : <http://plugins.qgis.org/plugins/LineDirectionHistogram/> (accessed 15.06.2021).
13. Шевырёв С. Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 138–143.
14. Richards J. A. Remote sensing digital image analysis. An introduction. – Second, revised and enlarged edition. – Berlin Heidelberg: Springer – Verlag, 1993. – 339 с.
15. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.
16. Кашницкий А. В., Балашов И. В., Лупян Е. А., Толпин В. А., Уваров И. А. Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 1. – С. 156–170.
17. Классификации по методу максимального подобия // ArcGIS Desktop. Краткий обзор справочника по инструментам геообработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.5/tools/spatial-analyst-toolbox/maximum-likelihood-classification.htm> (дата обращения: 15.06.2021).
18. Canny J. F. A. A Computational Approach to Edge Detection [Electronic resource] // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986. – Vol. pami-8, No.6. – P. 679–698. – Mode of access: <http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERSACS/canny1986.pdf> (accessed: 15.06.2021).
19. Galamhos C., Matas J., Kittler J. Progressive probabilistic Hough transform for line detection [Electronic resource] // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 1999. – P. 554–560. – Mode of access: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/9451/1999-Progressive-probabilistic-Hough-Transform-for-line-detection.pdf?sequence=1> (accessed 15.06.2021).
20. Hobbs W. H. Lineaments of the Atlantic border region // Geological Society of America Bulletin. – 1904. – Vol. 15. – P. 483–506.
21. Shahtahmassebi A., Yang N., Wang K., Moore N., Shen Z. Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing // Chinese Geographical Science. – 2013. – Vol. 23 (4). – P. 403–420. doi: <https://doi.org/10.1007/s11769-013-0613-x>.

22. Корзников К. А., Беляева Н. Г., Сандлерский Р. Б. Моделирование лесного покрова бассейна реки Венгери на острове Сахалин с применением данных дистанционного зондирования // Лесоведение. – 2020. – № 5. – С. 399–411. doi: 10.31857/S002411482005006X.
23. Верхотуров А. А., Мелкий В. А. Картографирование растительных сообществ подзоны темнохвойных лесов юга Сахалина на основе космических съемок // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 60–72. doi: 10.35595/2414-9179-2020-4-26-60-72.
24. Лобищева И. И. Растительность альпийского пояса Западно-Сахалинских гор в заказнике «Макаровский» // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 6. – С. 61–63.
25. Мельников Е. К., Рудник В. А., Мусейчук Ю. И., Рымарев В. И. Патогенное воздействие зон активных разломов земной коры Санкт-Петербургского региона // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 1994. – № 4. – С. 52–69.
26. Мельников Е. К., Шабаров А. Н. Оценка роли геодинамического фактора в аварийности трубопроводных систем // Записки Горного Института. – 2010. – Т. 188. – С. 203–206.
27. Долгополов Д. В. Использование данных дистанционного зондирования Земли при формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 151–159. doi: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-151-159.
28. Долгополов Д. В., Никонов Д. В., Полуянова А. В., Мелкий В. А. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 65–81.
29. Маркелов Д. А., Маркелов А. В., Минеева Н. Я., Акользин А. П., Кочуров Б. И., Шаповалов Д. А., Хуторова А. О., Григорьева М. А., Чукмасова Е. А. Нефтяное загрязнение ландшафтов Чечни: распознавание на местности – «Технологии с одного взгляда» // Экология урбанизированных территорий. – 2018. – № 2. – С. 52–60. doi: 10.24411/1816-1863-2018-12052
30. Карпик А. П., Середович В. А., Дубровский А. В., Ким Э. Л., Малыгина О. И. Анализ природных и техногенных особенностей геопространства чрезвычайной ситуации // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 3. – С. 178–184.
31. Жарников В. Б. Рациональное использование земель и основные условия его реализации // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 171–179.

Получено 13.07.2021

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

STUDY OF INFLUENCE OF THE FAULT ZONES ON VEGETATION COVER OF STATE TERRITORY OF THE NATURE SANCTUARY "DOLINSKY" (SAKHALIN ISLAND) USING EARTH'S REMOTE SENSING DATA

Olesya V. Kuptsova

Sakhalin State University, 2, Pogranichnaya St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia, Ph. D. Student, Department of Geology and Oil and Gas Business, phone: (924)190-00-08, e-mail: Korsuncevaolesy@gmail.com

Inna I. Lobishcheva

Sakhalin State University, 2, Pogranichnaya St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia, Senior Lecturer, Department of Geology and Oil and Gas Business, phone: (914)757-99-26, e-mail: slalinna@mail.ru

Alexey A. Verhoturov

Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 1B, Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Center for Collective Use, e-mail: ussr-91@mail.ru

Vyacheslav A. Melkiy

Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 1B, Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, D. Sc., Leading Researcher, Laboratory of Volcanology and Volcanic Hazards, e-mail: vamelkiy@mail.ru

Fault zones on the territory of Nature Sanctuary “Dolinsky” (Sakhalin Island), which are characterized by high geodynamic activity, are generally well distinguished when analyzing satellite imagery materials. In any territory, it is not difficult to identify the various plant communities that occupy it, as well as to determine their state by the content of phytomass determined by the vegetation index NDVI. The aim of the study is to test the validity of the hypothesis about the formation of abundant vegetation cover within the fault zones by analyzing the state of various plant communities by the volume of phytomass. Methods: decryption and analysis of Earth remote sensing data from Sentinel, Landsat and SRTM generation, geoinformation mapping on the ArcGIS platform. Results. In the course of the study, the state of the Nature Sanctuary “Dolinsky” analyzed by Landsat-8, Sentinel-2A satellite surveys, as well as SRTM data. Fault zones identified using the software systems ArcGIS, QGIS, and PyLEFA by lineament analysis, vegetation was classified by the maximum likelihood method, and its condition was determined by the values of the NDVI index, which reflects the content of phytomass in the study area. As result of the work carried out, an increase in phytomass revealed, and, consequently, good conditions for the growth of plant communities confined to the zones of distribution of faults of the earth's crust, and the reliability of the working hypothesis confirmed.

Keywords: Earth's remote sensing, aerospace image decoding, geographic information thematic mapping, geodynamic activity, Sentinel, Landsat, SRTM, NDVI, PyLEFA

REFERENCES

1. Aplonov, S. A. (2001). *Geodinamika [Geodynamics]*. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publ., 360 p. [in Russian].
2. Koronovsky, N. V. (2017). *Obshchaya geologiya [General geology]* (2nd ed., stereotype). Moscow: INFRA-M Publ., 474 p. [in Russian].
3. Zverev, A. T. (2013). *Inzhenernaya geodinamika [Engineering geodynamics]*. Moscow: MIIGAiK Publ., 324 p. [in Russian].
4. Parnachev, V. P. (2011). *Osnovy geodinamicheskogo analiza [Fundamentals of geodynamic analysis]*. Tomsk: NTL Publ., 308 p. [in Russian].
5. Trifonov, V. G. (1985). Features of the development of active faults. *Geotektonika [Geotectonics]*, 19(2), 16–26. [in Russian].
6. Trifonov, V. G. (2001). Living faults of the Earth's crust. *Sorosovskiy obrazovatelny zhurnal [Soros Educational Magazine]*, 7(7), 66–74 [in Russian].
7. Zhmakin, E. Ya., & Davydova, E. G. (2010). Faults of Earth's crust and vegetation features in zone of their influence on territory of the Kaluga region. *Vestnik Kaluzhskogo universiteta [Bulletin of the Kaluga University]*, 3, 57–60 [in Russian].
8. USGS EROS Archive. Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled. GloVis Website USGS (U.S. Geological Survey). (n. d.). Retrieved from <https://glovis.usgs.gov/aP> (accessed 15.06.2021).
9. United States Geological Survey (USGS). (n. d.). Retrieved from <https://doi.org/earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 15.06.2021).
10. Sentinel Missions. Website ESA (European Space Agency). (n. d.). Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (accessed 15.06.2021).
11. Resources for ArcMap. ESRI.com. (n. d.). Retrieved from <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources> (accessed 15.06.2021).
12. The QGIS Line Direction Histogram Plugin. Håvard Tveite. Created using Sphinx 1.6.7. (n. d.). Retrieved from <http://plugins.qgis.org/plugins/LineDirectionHistogram/> (accessed 15.06.2021).

13. Shiverov, S. L. (2018). LEFA software: an automatized structural analysis of remote sensing imagery in MATLAB environment. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Advances in Current Natural Sciences]*, 10, 138–143 [in Russian].
14. Richards, J. A. (1993). *Remote sensing digital image analysis. An introduction* (2nd, revised and enlarged ed.). Berlin Heidelberg: Springer – Verlag, 339 p.
15. Shovengerdt, R. A. (2010). *Distsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy. [Remote sensing. Models and methods of image processing.]*. Moscow: Tekhnosfera Publ., 560 p. [in Russian].
16. Kashnitskiy A. V., Balashov I. V., Lupyan E. A., Tolpin V. A., & Uvarov I. A. (2015). Creating tools for remote processing of satellite data in modern information systems. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]*, 12(1), 156–170 [in Russian].
17. Classifications by the maximum similarity method. In *ArcGIS Desktop. Kratkiy obzor spravochnika po instrumentam geobrabotki [ArcGIS Desktop. A brief overview of the handbook of geoprocessing tools]*. Retrieved from <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.5/tools/spatial-analyst-toolbox/maximum-likelihood-classification.htm> (accessed: 15.06.2021).
18. Canny, J. F. A. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pami-8(6), 679–698. Retrieved from <http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERSACS/canny1986.pdf> (accessed: 25.03.2021).
19. Galamhos, C., Matas, J., & Kittler, J. (1999). Progressive probabilistic Hough transform for line detection. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 554–560). Retrieved from <https://dSPACE.cvu.cz/bitstream/handle/10467/9451/1999-Progressive-probabilistic-Hough-Transform-for-line-detection.pdf?sequence=1> (accessed 15.06.2021).
20. Hobbs, W. H. (1904). Lineaments of the Atlantic border region. *Geological Society of America Bulletin*, 15, 483–506.
21. Shahtahmassebi, A., Yang, N., Wang, K., Moore, N., & Zhangquan, Sh. (2013). Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing. *Chinese Geographical Science*, 23(4), 403–420. doi: <https://doi.org/10.1007/s11769-013-0613-x>.
22. Korznikov, K. A., Belyaeva, N. G., & Sandlersky, R. B. (2020). Modeling the Forest Cover of the Vengeri River Basin on the Sakhalin Island Using the Remote Sensing Data. *Lesovedenie [Russian Journal of Forest Science]*, 5, 399–411. doi: <https://doi.org/10.31857/S002411482005006X> [in Russian].
23. Verkhoturov, A. A., & Melkiy, V. A. (2020). Mapping of vegetation communities of the subzone of dark coniferous forests of the South Sakhalin based on space surveys. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International Conference*, 26(2), 60–72. doi: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-4-26-60-72>.
24. Lobishcheva, I. I. (2011). Vegetation of the alpine belt of the Western Sakhalin Mountains in the reserve "Makarovskiy". *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 6, 61–63 [in Russian].
25. Melnikov, E. K., Rudnik, V. A., Museychuk, Yu. I., & Rymarev, V. I. (1994). Pathogenic impact of zones of active faults of the Earth's crust of the St. Petersburg region. *Geoekologiya. Inzhenernaia geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya [Geocology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology]*, 4, 52–69 [in Russian].
26. Melnikov, E. K., & Shabarov, A. N. (2010). Assessment of the role of geodynamic factor in the accident rate of pipeline systems. *Zapiski Gornogo Instituta [Notes of the Mining Institute]*, 188, 203–206 [in Russian].
27. Dolgopolov, D. V. (2020). Use of earth remote sensing data for formation of geodata space of pipeline transport. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(3), 151–159. doi: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-3-151-159> [in Russian].
28. Dolgopolov, D. V., Nikonov, D. V., Poluyanov, A. V., & Melkiy, V. A. (2019). Possibilities of visual interpretation of trunk pipelines and infrastructure facilities using satellite images of high and ultra-high spatial resolution. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(3), 65–81. doi: [10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81](https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81) [in Russian].
29. Markelov, D. A., Markelov, A. V., Mineeva, N. Ya., Akolzin, A. P., Kochurov, B. I., Shapovalov, D. A., Khutorova, A. O., Grigorieva, M. A., & Chukmasova, E. A. (2018). Oil pollution of the landscapes of Chechnya: recognition on the ground – "Technologies at a glance". *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*

[*Ecology of urbanized territories*], 2, 52–60. doi: <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2018-12052> [in Russian].

30. Karpik, A. P., Seredovich, V. A., Dubrovskij, A. V., Kim, E. L., & Malygina, O. I. (2012). Analysis of natural and man-made features of the emergency geospace. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 3. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying] (pp. 178–184). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

31. Zharnikov, V. B. (2017) Rational use of land and the main conditions for its implementation. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 22(3), 171–179 [in Russian].

Received 13.07.2021

© O. V. Kuptsova, I. I. Lobishcheva, A. A. Verkhoturov, V. A. Melkiy, 2021