

УДК 550.835

**ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В РАЙОНЕ МАЛОГО ХИНГАНА
ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

В. И. Усиков, Л. Н. Липина

*Институт горного дела ДВО РАН, E-mail: v-i-usikov@yandex.ru,
ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

Рассмотрены вопросы использования материалов дистанционного зондирования Земли для оценки геоэкологической ситуации на территории, расположенной в пределах хребта Малый Хинган (Дальний Восток). По результатам анализа материалов космической съемки Сутарского золотороссыпного полигона определены основные тенденции изменения во времени состояния земельных угодий, нарушенных горными работами. Выявлена высокая степень участия в этом процессе естественного восстановления биогеоценозов. С помощью нормализованного дифференцированного вегетационного индекса (NDVI) выполнена оценка характера и темпов самозарастания нарушенных земель. Установлено, что полное восстановление растительного покрова на полигонах россыпной золотодобычи до состояния, сравнимого с примыкающими площадями, происходит за 7–10 лет.

Дистанционное зондирование Земли, спутниковые снимки, золотороссыпной узел, нормализованный дифференцированный вегетационный индекс, самозарастание

DOI: 10.15372/FTPRI20180217

Космические средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время получили широкое применение во всем мире, выросло разнообразие создаваемых типов и общее их количество. За последние годы на орбите появились спутники с оптикоэлектронными системами сверхвысокого разрешения нового поколения (WorldView и GeoEye), уникальные многофункциональные космические аппараты (ALOS), группировки спутников малого класса мониторингового назначения (RapidEye), аппараты с радиолокаторами высокого и сверхвысокого разрешения (TerraSAR-X, COSMO SkyMed, RADARSAT-2) [1].

Наиболее востребованы следующие зарубежные космические аппараты ДЗЗ: ALOS (Япония), Landsat, WorldView и EO-1 (США), ERS, ENVISAT (Европейское космическое агентство), RADARSAT-1,2 (Канада), TerraSAR-X и TanDEM-X (Германия), COSMO-SkyMed (Италия), IRS (Индия), RapidEye (Германия), SPOT (Франция), FORMOSAT-2 (Тайвань) и др. [2].

Российские спутниковые снимки, наиболее часто используемые для решения научных и народнохозяйственных задач, осуществляются космическими аппаратами Ресурс-П, Канопус-Б, Метеор-М. Данные ДЗЗ обеспечивают исчерпывающую и достоверную информацию, являются общедоступным измерительным инструментом, который отвечает следующим требованиям: глобальность зоны наблюдения, объективность получаемой информации, высокая повторяемость, воспроизводимость, наличие архивов долговременных непрерывных наблюдений [3].

В последнее время активно разрабатываются методы дистанционного экологического мониторинга, основанные на применении данных ДЗЗ. Мониторинг включает в себя регистрацию, накопление и интерпретацию полученных данных о состоянии природной среды и призван

обеспечивать управляющее воздействие на ее взаимно влияющие природные и техногенные компоненты сферы [4]. Данный вид работ сопровождается значительным объемом информации, поэтому трудоемкий процесс сбора, хранения и обработки все большее число исследователей [5] поручает современным информационным технологиям и созданным на их основе геоинформационным системам.

Цель исследования — оценка геоэкологического состояния территории в горнопромышленных районах Дальневосточного региона с применением ДЗЗ. Задачи работы: проанализировать, обобщить имеющиеся данные по указанной тематике; оценить основные факторы, определяющие возможность и скорость естественного зарастания нарушенных территорий на примере Малого Хингана Дальнего Востока.

Для решения поставленной задачи использованы спутниковые снимки серии Landsat (NASA USA), имеющие следующие характеристики: оптимальное соотношение параметров пространственное разрешение — охват территории — размер файла; регистрация достаточно широкого диапазона электромагнитного спектра; регулярность наблюдения территории; свободный доступ и удобный интерфейс загрузки архивов. Спутник Landsat 8 получает изображения в видимом диапазоне волн (в ближнем и дальнем инфракрасном), с разрешением снимков от 15 до 100 м в пикселе. В сутки снимается порядка 400 сцен.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта оценки выбрана территория Малохинганской площади, расположенная в пределах хребта на границе Еврейской АО, Амурской области и Китая. Для этой территории характерен низкогорный слаборасчлененный рельеф. Хребты не превышают 200–500 м в осевых частях и 100–300 м — в краевых. Бассейны наиболее крупных рек Сутары и Помпеевки имеют равнинный рельеф. Общий план гидросети определяется неотектоническими структурами с диагональной и ортогональной ориентировками. Основными геоморфологическими структурами Малохинганской площади являются Хинганское, Дитурское и Помпеевское поднятия и Сутарская депрессия.

Растительность преимущественно лесная. Выделяется пять высотных поясов: первый (нижний) — осоковые и сфагновые мари без древесной растительности или с лиственничным редколесьем; во втором поясе на сухих склонах распространены дубняки с леспедецей двуцветной, лещиной и разнотравьем, на увлажненных — багульниковые лиственничники; третий высотный пояс представлен кедрово-широколиственными лесами; четвертый — темнохвойными пихтово-еловыми лесами; пятый — подгольцовыми группировками с кедровым стлаником и березой шерстистой [6, 7].

На территории Малого Хингана на небольшой площади сосредоточено значительное количество разноотраслевых объектов недропользования: Хинганский оловодобывающий комбинат (в настоящее время не работает), Теплоозерский цементный завод, Лондоковский известковый завод, Кульдурский бруситовый карьер, Сутарский, Биджанский и Помпеевский золотороссыпные узлы, которые в разной степени оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Два объекта связаны с выемкой значительных объемов горной массы при открытой добыче: Ушумунский разрез и Кимканский железорудный комбинат. Обычно такие виды работ сопровождаются нарушением гидрологического режима территории и осушением прилегающих к карьерам площадей. Известняковые и бруситовый карьеры расположены на высоких гипсометрических уровнях, поэтому существенного влияния на гидрологию не оказывают.

Россыпная золотодобыча на территории Сутарского района велась с конца XIX в. до начала XXI в. (рис. 1). До середины XX в. она проводилась кустарным способом, затем стали использоваться промышленные — гидравлический и дражный. В результате был серьезно нарушен экологический баланс в крупных лесных районах Хингана, долины рек и ключей на протяжении десятков километров кардинально изменились.



Рис. 1. Местоположение золотороссыпных узлов на территории Сутарского золотоносного района: 1 — Сутарский; 2 — Биджанский; 3 — Помпеевский

На ряде полигонов золотодобычи в различных районах страны проведены опыты по успешному естественному зарастанию техногенных земель после выполнения горнотехнической рекультивации [8]. Это позволяет оставлять под естественное зарастание полигоны, удаленные от населенных пунктов, что обеспечивает существенную экономию труда и средств. Оценка самозарастания техногенных земель — одна из задач настоящих исследований.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Космические снимки районов исследования взяты из базы данных EROS (USGS Earth resources Observation & Science (EROS)). Обработка мультиспектральных данных проводилась с помощью геоинформационной системы Quantum GIS (QGIS) в соединении с GRASS GIS и базой данных СУБД SQLite.

Для решения разных задач, связанных с оценкой состояния природной среды, подбирались сочетания из трех каналов, по которым синтезировались цветные изображения и использовались самые информативные. Наиболее близкая к человеческому восприятию комбинация: спектральные полосы 4–3–2, зарегистрированные в видимом диапазоне электромагнитного спектра.

Загрязнение продуктами разложения сульфидов позволяют оценить комбинации 7–4–2, 5–6–2, 5–6–4 (изображения в указанных комбинациях обычно практически идентичны). Весьма информативным оказалось синтезированное изображение в каналах 7–6–5, которое чувствительно к наличию воды на земной поверхности. Открытые водоемы на снимках отображаются практически черным цветом, обводненные участки — темным тоном.

Одним из основных методических приемов было использование нормализованного дифференцированного вегетационного индекса NDVI. Сравнивая между собой коэффициенты спектральной яркости f_1 и f_2 изображения в ближнем инфракрасном и красном участках, можно судить о состоянии растительности данного района. Индекс NDVI рассчитывается по формуле

$$NDVI = \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2},$$

т. е. плотность биомассы растительности в определенной точке изображения пропорциональна разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей [9, 10]. Используя формулу, вычислялись значения NDVI для каждого

пикселя и строилось изображение в соответствии с дискретной шкалой. По полученной карте оценивалось состояние растительного покрова на исследуемой площади. Как осушение местности, так и ее переувлажнение угнетает развитие биомассы растительного покрова, что находит отражение на картах NDVI. Величина индекса может изменяться от -1.0 до $+1.0$, но величина нормализованного дифференцированного вегетационного индекса принимает положительные значения, и чем больше фитомасса, тем он выше — от 0.3 до 0.8 [11, 12]. Более высокое значение индекса связано с высоким уровнем здорового растительного покрова. Низкие значения порядка $0.3-0.4$ свидетельствуют о недостатке или избытке влаги или заболевании растительности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2а приведен пример изображения территории р. Сутара в каналах 7–6–5. Четко выделяются искусственные водоемы, возникшие в процессе добычи в руслах рек и ключей, что позволяет оценить водонасыщенность грунтов. Так, самое большое пятно на снимке соответствует обширной осоковой и сфагновой мари с голубичником и листовничным редколесьем. С высокой степенью контрастности выделяются коммуникационные линии: сеть дорог, просек, временных энергосетей. Эта методика позволила оценить площади осушения земель вокруг Кимканского железорудного и Ушумунского бурогоугольного карьеров.

На ту же площадь составлена карта NDVI, вычисленная с помощью калькулятора растров QGIS (рис. 2б).

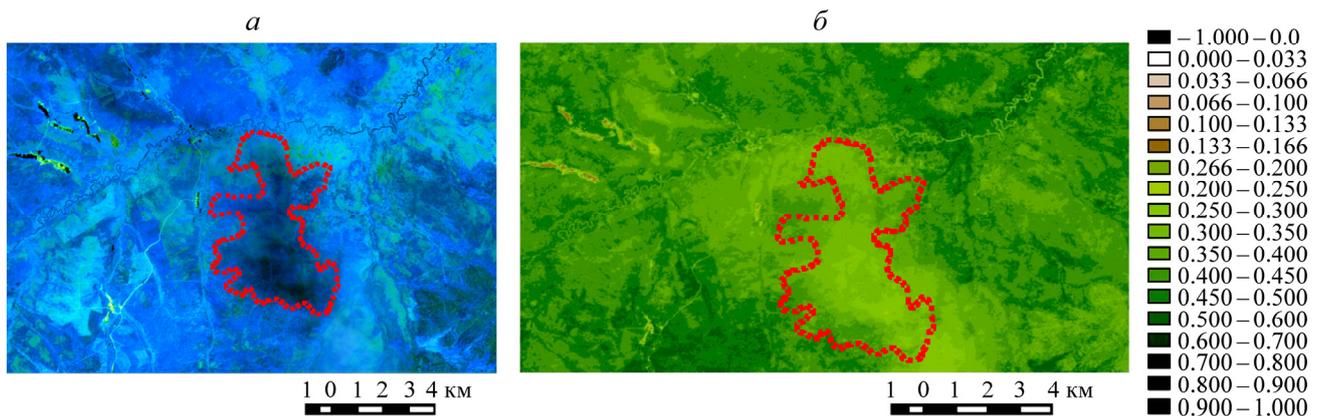


Рис. 2. Синтезированное изображение площади р. Сутара: каналы 7–6–5 (а) и карта NDVI среднего течения р. Сутара (б): выделенная область — контур водонасыщенной осоковой и сфагновой мари

В данном случае низкие значения индекса ($0.2-0.35$) фиксируют переизбыток влаги, т. е. отражают состояние растительного покрова на существенно переувлажненных площадях с угнетенной растительностью. Анализируя общее состояние фитоценозов на рассматриваемой территории, можно сделать вывод о том, что образовавшиеся вторичные растительные сообщества на посттехногенном пространстве по качеству соответствуют тем, которые расположены в береговой зоне рек Сутара, Переходная и в северо-западной части района с пологим рельефом. Расположение этих площадей, соответствующих марям, на рис. 2 практически совпадает.

На рис. 3 представлены три добычных участка Сутарского золотоносного узла общей площадью более 500 га. После прекращения разработок на Сутарском месторождении рекультивационные работы не проводились. Однако на снимках последних лет на нарушенных землях наблюдается процесс естественного восстановления биогеоценозов (самозарастание), о чем свидетельствует временная динамика изменения NDVI.

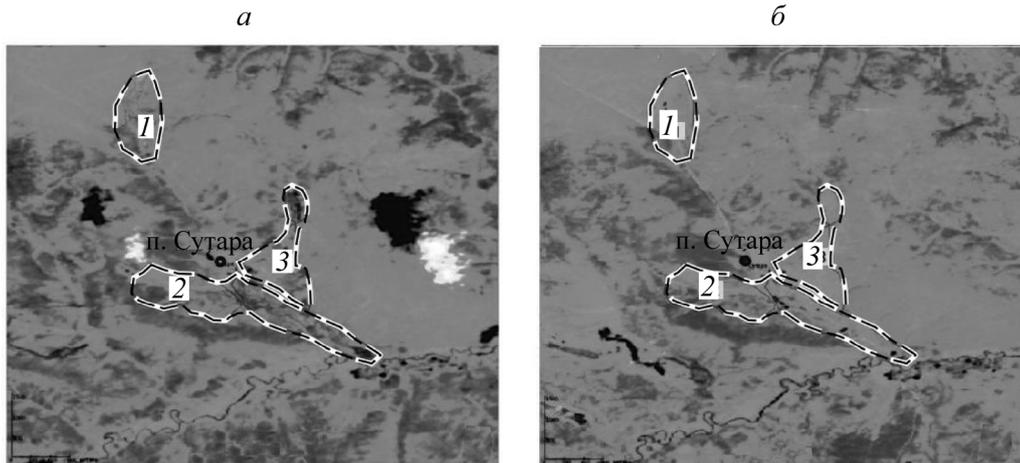


Рис. 3. Карта NDVI на часть территории Сутарского золотоносного узла: *а* — в 2000 г. и *б* — в 2014 г.

Видно, что на большей части площади вокруг пос. Сутара (участки 1–3), где добыча проводилась в 1999 г., растительный покров восстановлен полностью, на площадях с более поздней разработкой самозарастание произошло только частично. В 2000 г. общее проективное покрытие на исследуемых площадках составило 35 %, в 2014 г. — 90 %, что свидетельствует о естественном самозарастании.

Естественное зарастание до настоящего времени занимает ведущее положение в формировании растительности на нарушенных землях, и знание его особенностей позволит разработать мероприятия по ускорению этого процесса. Способность к самозарастанию первично свободных субстратов дает возможность снизить, а иногда и вовсе исключить объем активных рекультивационных работ.

Восстановление растительного покрова на нарушенных землях определяется группами факторов, влияющих на скорость их естественного зарастания: эдафические (почвенно-грунтовые), биологические и природно-климатические. Для оценки состояния самозарастания важно определить общее проективное покрытие поверхности почвы растениями. При нормальном ходе зарастания на второй или третий год проективное покрытие отдельных участков варьирует от 20 до 75 %, при неблагоприятном — травостой почти не формируется или составляет менее 20 %. Пионерные растения (кипрей узколистый, хвощ и др.) являются индикаторами темпов и стадий зарастания, их появление на нарушенном субстрате означает начало естественного самозарастания и почвообразования [8, 13].

На более увлажненных и богатых субстратах происходит осоковое и вейниковое зарастание. Характер протекания этого процесса оценивался с применением разработанной в Институте космических исследований РАН системы ВЕГА-Science для мониторинга состояния земель и растительного покрова на основе спутниковых данных наблюдения Земли [14].

В ИГД ДВО РАН в рамках исследования проведен анализ нарушенных земель с помощью спутникового сервиса “ВЕГА” за период 2001–2015 гг. на площадках, заложенных в районе полигонов золотодобычи кл. Любавинского, кл. Сергиевского, рек Сутара и Переходная.

В результате наблюдения процесса самозарастания установлено, что, если в 1999 г. на площади нижнего течения р. Переходной и кл. Сергиевского нарушенные участки представляли собой сплошную техногенную пустошь, лишенную растительности, то в 2000 г. восстановился травяной покров, а в 2003 появилась густая, местами практически непроходимая поросль кустарников. Окружающие добычные участки территории заняты преимущественно вторичными лесами, их NDVI и цвет на синтезированных снимках не различаются. По результатам

исследования составлены реестры видов растительности, рассчитаны коэффициенты сходства по качественным признакам Серенсена–Чекановского [15] (данный коэффициент принимает значения от 0 до 1). Коэффициент сходства сравниваемых видов растительности (площадки 1–2 и 2–3) составляет 0.96 и 0.78 соответственно. По значению коэффициента сходства достаточно уверенно можно сказать, что видовой состав практически идентичен на всех исследуемых участках.

Саморекультивация нарушенных земель на водоразделах активно происходит благодаря быстрому разрастанию кустарничков, а по окраинам болот — багульника и андромеды. Появление ивы, рябины, а также всходов и подроста березы, осины, лиственницы выявляет окончательный этап зарастания. Конечным результатом процесса самозарастания являются фитоценозы, близкие к зональным, формирование которых за счет жестких эдафических условий задерживается на первых этапах (вселение, экотопический отбор и др.). Дальнейшее их разрастание и появление подроста указывает на начало восстановления исходной растительной ассоциации и облесения участка.

ВЫВОДЫ

При изучении геоэкологической ситуации в горнодобывающих регионах с помощью мультиспектральных снимков Landsat необходим подбор сочетаний спектральных полос для синтеза цветных снимков с целью оценки различных характеристик земной поверхности. В частности, изменение гидрологического режима и воздействие на русла рек и других водоемов наиболее эффективно идентифицируются по сочетанию каналов 7-6-5, а распространение химического загрязнения продуктами разложения сульфидов — по группе полос 6-5-4.

Применение нормализованного дифференцированного вегетационного индекса для карт исследуемых территорий, полученных с помощью спутникового мониторинга растительного покрова VEGA-Science, позволило оценить характер и темп самозарастания нарушенных золотодобываемых земель. По результатам сопоставления наземных и дистанционных исследований установлено, что негативные последствия эксплуатации россыпных месторождений частично нивелируются в процессе техногенеза природными факторами (на отвалах происходят процессы самозарастания). Техногенный ландшафт постепенно трансформируется в естественный.

Восстановление растительного покрова на полигонах россыпной золотодобычи до состояния, сравнимого с примыкающими площадями, в данном районе происходит за 7–10 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болсуновский М. А. Перспективные направления развития дистанционного зондирования Земли из космоса // Геоматика. — 2009. — № 2. — С. 12–15.
2. Носенко Ю. И., Лошкарев П. А. Единая территориально-распределенная информационная система дистанционного зондирования Земли — проблемы, решения, перспективы: Ч. 1 // Геоматика. — 2010. — № 3. — С. 35–42.
3. Исаев А. С., Баргалева С. А., Лупян Е. А. Спутниковое зондирование Земли — уникальный инструмент мониторинга лесов России // Вестн. РАН. — 2014. — Т. 84. — № 12. — С. 1073–1079.
4. Зольников И. Д., Баландин В. А., Богуславский А. Е. Банк данных и метаданных “Геосреда Новосибирска” // Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий: материалы Междунар. симп. — Екатеринбург: Аква-Пресс. — 2001. — Т. 2. — С. 760–767.

5. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Андреева Н. В., Счастливец Е. Л., Быков А. А.** Оценка пылевого загрязнения атмосферы угледобывающих районов Кузбасса в зимний период по данным дистанционного зондирования Земли // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 126–137.
6. **Физико-географическое районирование СССР.** Характеристика региональных единиц / под ред. Н. А. Гвоздецкого. — М.: Изд-во МГУ, 1968. — 576 с.
7. **Фетисов Д. М.** Антропогенная нарушенность природных ландшафтов российской части Малого Хингана // Вестн. ДВО РАН. — 2008. — № 3. — С. 51–57.
8. **Капелькина Л. П.** О естественном зарастании и рекультивации нарушенных земель Севера // Успехи совр. естествознания. — 2012. — № 11-1. — С. 98–102.
9. **Borzuchowski J. and Schulz K.** Retrieval of leaf area Index (LAI) and soil water content (WC) using hyperspectral remote sensing under controlled glass house conditions for spring barley and sugar beet, Remote Sensing, 2010, No. 2. — P. 1702–1721.
10. **Чадра А. М., Гош Г. С.** Дистанционное зондирование и географические информационные системы. — М.: Техносфера, 2008. — 312 с.
11. **Черепанов А. С.** Вегетационные индексы // Геоматика. — 2011. — № 2. — С. 98–102.
12. **О дистанционном зондировании Земли** [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://epizodsspace.no-ip.org/bibl/sutyrina/distantcionnoe/sutyrina-distantcionnoe-2013.pdf>
13. **Месяц С. П., Волкова Е. Ю.** Базовые положения стратегии возвращения нарушенных земель техногенных ландшафтов биосферному фонду. — М.: Горная книга, 2014. — № S4-13. — С. 3–11.
14. **Озарян Ю. А.** Комплексная оценка состояния техногенной пустоши Комсомольского горнопромышленного района с использованием спутникового сервиса “ВЕГА” // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2016. — Т. 13. — № 1. — С. 70–78.
15. **Чибрик Т. С., Елькин Ю. А.** Формирование фитоценозов на нарушенных промышленностью землях: — Свердловск: изд-во Урал. ун-та, 1991. — 220 с.

Поступила в редакцию 16/VI 2017