

**С. Г. Мышляков** (компания «Совзонд»)

В 2004 г. окончил Белорусский государственный университет по специальности «география». Работал в научно-исследовательском предприятии по землеустройству, геодезии и картографии «БелНИЦзем» (Минск, Беларусь). В настоящее время — руководитель блока тематической обработки данных ДЗЗ компании «Совзонд».

**О. С. Сизов**

В 2005 г. окончил Алтайский государственный университет по специальности «эколог-природопользователь». В настоящее время — инженер по обработке ДДЗ компании IDA System (резидент Сколково). С мая 2012 г. (по совместительству) — научный сотрудник Института криосферы Земли СО РАН. Кандидат географических наук.

**Е. Н. Горбачева** (компания «Совзонд»)

В 2008 г. окончила географический факультет Белорусского государственного университета. После окончания университета работала научным сотрудником в УП «Космоаэрогеология» (Минск, Беларусь). В настоящее время — ведущий специалист по тематической обработке данных ДЗЗ компании «Совзонд».

**А. С. Скачкова** (компания «Совзонд»)

В 2012 г. окончила географический факультет Белорусского государственного университета по специальности «геоинформационные системы». В настоящее время — специалист по тематической обработке данных ДЗЗ компании «Совзонд», аспирант географического факультета БГУ.

**А. В. Габрашитова**

В 2000 г. окончила Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова по специальности «охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов». В настоящее время — начальник отдела охраны окружающей среды Мирнинского ГОК АК «АЛРОСА».

## Космический мониторинг антропогенного воздействия в районе алмазодобывающей деятельности (на примере Мирнинского ГОК)

### АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ, ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ РАБОТ

Низкая устойчивость северных экосистем к различным формам антропогенной деятельности обусловлена низким видовым разнообразием, низкой биологической продуктивностью, обедненностью трофических связей и низкой устойчивостью северных организмов [1]. Все это приводит к тому, что естественное восстановление техногенно преобразованных биоценозов на Севере занимает большее количество времени по

сравнению с экосистемами южных регионов, где выше продолжительность теплого периода и выше скорости геохимических и биологических процессов.

Основными формами воздействия алмазодобывающей промышленности на окружающую природу в условиях многолетней мерзлоты являются загрязнение водной среды, воздушного бассейна и отторжение земель. Антропогенное воздействие сопровождается нарушением и загрязнением значительных площадей природных ландшафтов, при этом значительную роль

играет создание хвостохранилищ, отвалов пустых пород, разработка россыпных месторождений.

Одним из наиболее развитых в горно-промышленном отношении районов в Республике Саха (Якутия) является район деятельности Мирнинского ГОК (входит в состав АО «АЛРОСА»). Работы на коренном месторождении алмазов «Мир» (вблизи г. Мирного) были начаты в 1958 г. В 2001 г. отработка запасов кимберлитовой трубки открытым способом завершилась, отметка дна карьера в центральной части составила — 190 м (глубина карьера — 525 м). Начиная с 2009 г. добыча на месторождении ведется закрытым способом. Открытые горные работы на кимберлитовой трубке «Интернациональная» (16 км к юго-западу от г. Мирного) проводились с 1971 по 1980 г.; с 1999 г. добыча здесь также переведена на шахтный способ. Кроме этого, в настоящее время МГОК разрабатывает россыпи «Горное», «Ирелях», «Водораздельные галечники» и «Левобережная».

Впервые комплексные исследования в районе месторождения «Мир» и «Интернациональное» были проведены силами Института прикладной экологии Севера (ИПЭС) АН Республики Саха (Якутия) в 2001 г. Позже, в 2003 г., была выполнена работа по оценке влияния деятельности Мирнинского ГОК на окружающую среду и состояние селитебных территорий. В первую очередь внимание обращалась на биотическую составляющую биологических систем, которая ранее была менее всего изучена [2]. Подобные работы были продолжены в 2011 г. [3], их проведение планируется на регулярной основе и в будущем с периодичностью раз в 3 года. По результатам исследований издано большое количество работ, посвященных влиянию горной промышленности на почвы, растительность, животный мир, а также комплексной оценке трансформации экосистем [1]. Таким

образом, на примере Мирнинского ГОК была реализована система комплексного наземного мониторинга состояния органического мира в районе деятельности старейшего алмазодобывающего предприятия России [4, 5].

В 2015 г. руководство АК «АЛРОСА» приняло решение о выполнении работ по картографированию и оценке состояния экосистем окрестностей г. Мирного с использованием дистанционных методов на основе высокодетальной космической съемки.

Работы выполнялись в летний период 2015 г. специалистами компании «Совзонд» и включали решение следующих задач:

1. Поставка данных оперативной и архивной космической съемки на территорию, прилегающую к г. Мирному.
2. Создание базовой планово-картографической основы (ПКО) масштаба 1:10 000.
3. Создание серии тематических картографических произведений по результатам обработки данных космической съемки:
  - выявление изменений площадей антропогенных объектов (объекты недропользования, дороги, участки сейсмопрофилей, здания, сооружения);
  - определение границ расположения объектов недропользования (карьеров, хвостохранилищ, терриконов, отвалов);
  - картографирование экологического состояния водоемов;
  - обнаружение участков водопроявления и обводненности территории;
  - выявление изменений почвенно-растительного покрова на основе дистанционного анализа биомассы;
  - картографирование деградации древесно-кустарниковой растительности.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА РАБОТ

В ходе выполнения работ территория была обеспечена двукратным покрытием панхроматическими и мультиспектральными

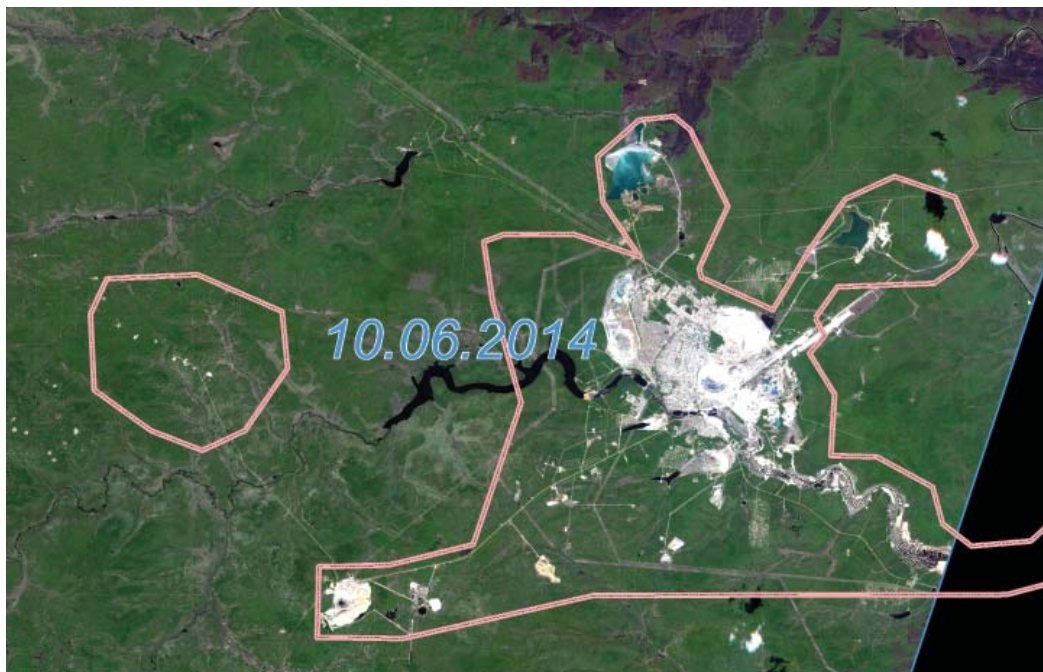


Рис. 1. Съемка RapidEye за 2014 г.

Сенсор	Имя файла	Дата съемки
QuickBird	QB_2004_06_08.tif	08.06.2004
GeoEye-1	GE_2014_08_31_PSH.tif	31.08.2014
RapidEye	RE_2014-06-10.tif	10.06.2014
RapidEye	RE_2013-06-09.tif	09.06.2013

Табл. 1. Сводная информация о снимках, использовавшихся в работе

изображениями с разрешением на местности не хуже 1 м за период апрель–сентябрь 2004 г. (QuickBird) и апрель–сентябрь 2014 г. (GeoEye-1), дополнительно была выполнена двукратная съемка RapidEye за 2013–2014 гг. (рис. 1), (табл. 1).

Кроме высокодетальной съемки, для выявления крупных изменений в работе были задействованы также актуальные и архивные снимки со спутников Landsat-

5, 7, 8 за 1999–2014 гг. из архива Геологической службы США [6].

Ортотрансформирование всех полученных данных выполнялось с использованием данных выполнялось с использованием RPC-коэффициентов и цифровой модели рельефа, созданной на основе топографической карты открытого пользования масштаба 1:200 000. Для снимков, по которым производились расчеты индексов и спектральный анализ, был проведен пересчет безразмерных значений пикселей (DN) в коэффициенты спектральной яркости (reflectance). Кроме этого, для снимков QuickBird-2 и GeoEye-1 было улучшено пространственное разрешение мультиспектральных каналов за счет использования панхроматического канала (паншарпенинг) (рис. 2), а также для удобства визуализации создана бесшовная ортомозаика в естественных цветах (RGB).

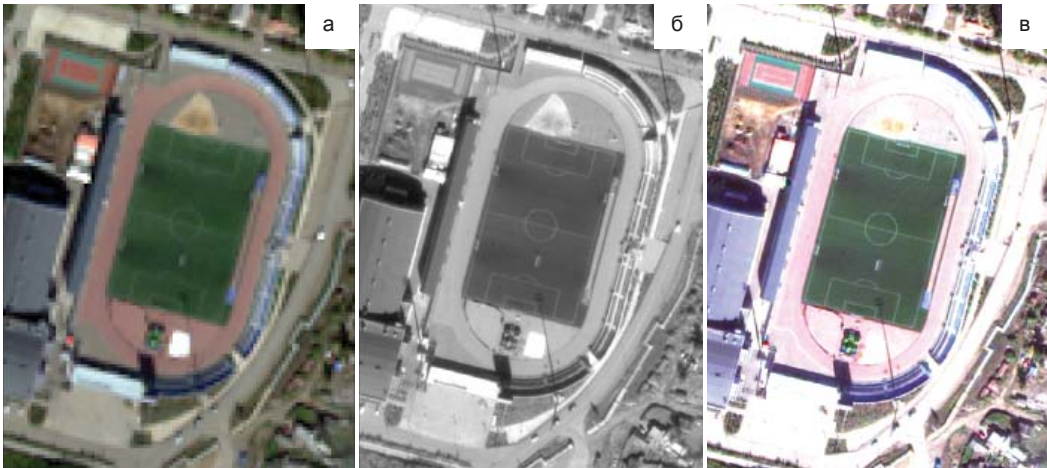


Рис. 2. а) Мультиспектральный снимок (1,65 м); б) панхроматический снимок (0,6 м); в) результат паншарпенинга

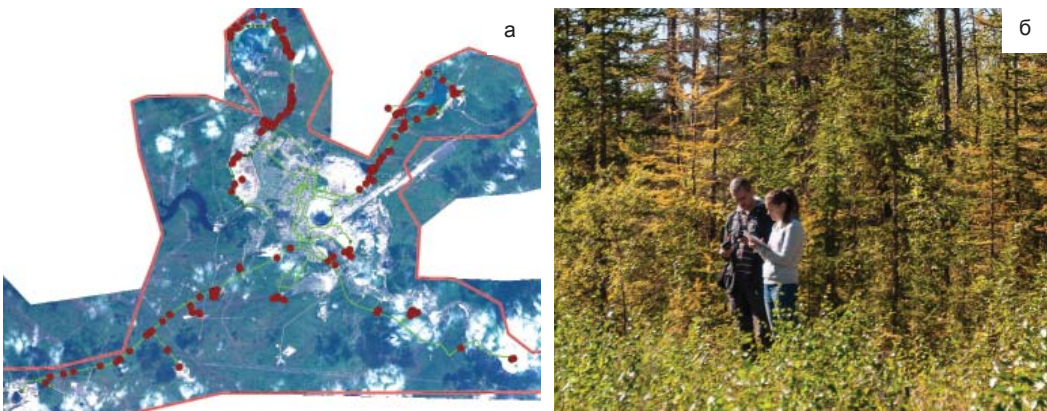


Рис. 3. а) Маршрут (зеленый цвет) и точки (бордовый цвет) полевого обследования; б) описание ключевого участка (эталона)

Технологическая схема процесса дешифрирования включала несколько этапов:

1. Подготовительный этап, в ходе которого решались задачи:

- поиска, заказа и предварительной обработка актуальной и архивной космической съемки (QuickBird, GeoEye-1, RapidEye и Landsat);
- сбора картографических материалов — были собраны и обработаны

топографические карты, схемы территориального устройства, а также границы кадастровых выделов;

- сбора и изучения литературных источников – отчетов о работах по оценке современного состояния экосистем и научных публикаций.

В ходе предварительного изучения материалов были намечены точки интереса и составлены маршруты полевого обследования.

2. Полевой этап, который заключался в проведении осмотра и описании ключевых эталонных участков. В ходе осмотра выполнялось описание рельефа, растительности, определялось наличие и степень антропогенного воздействия, проводилось фотографирование общей ситуации, а также объектов, которые не отображаются на космических снимках. Всего было обследовано более 140 точек (рис. 3), включающих участки загрязнения водоемов, участки водопроявления и обводненности участки деградации лесной растительности, а также объекты горнодобывающей инфраструктуры.

3. Камеральный этап, суть которого состоит в распознавании объектов на снимках в лабораторных условиях, путем сопоставления изображения с имеющимися эталонами и знаниями дешифровщика. В работе использовались четыре основных метода извлечения тематической информации:

1. автоматическое дешифрирование;
2. экспертное (визуальное) дешифрирование;

3. создание и анализ разновременных композиций;

4. расчет и анализ индексных изображений.

К примеру, процесс выявления изменений лесного покрова и последствий антропогенного воздействия был основан на анализе разновременных композиций — изображений, сочетающих снимки за различные даты в одном или нескольких спектральных диапазонах. При этом разные цвета на изображении соответствуют положительным или отрицательным типам изменений на местности (рис. 4).

Таким образом, используемые методы и приемы обработки позволили максимально учесть все природные и антропогенные особенности территории и получить в итоге достоверные результаты.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Создание базовой планово-картографической основы (ПКО) масштаба 1:10 000 позволило получить детальную топологию

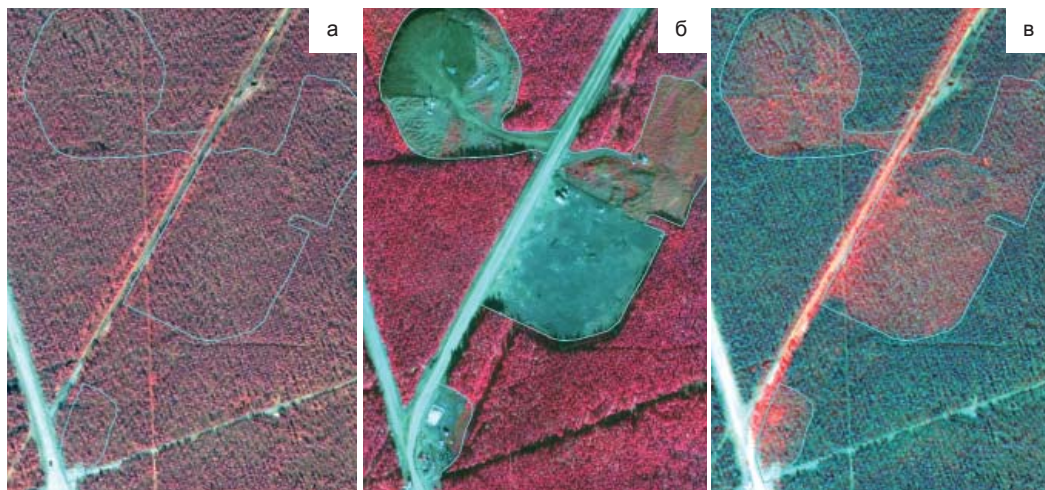


Рис. 4. Пример выявления изменений: а) снимок 2004 г.; б) снимок 2014 г.; в) разновременной композит (изменения отображаются красным цветом)

скую модель, достоверно отражающую текущее состояние местности.

Среди основных категорий земель большая часть площади занята лесами — 19 459,71 га (62,58%), при этом свежие гари занимают 137,49 га и приурочены к северной и северо-западной частям исследуемого участка.

Земли, занятые добычей полезных ископаемых (карьеры, отвалы, терриконы, хвостохранилища, кустовые площадки добычи нефти, поля дражной разработки алмазов и узлы обратной закачки карьерных вод), занимают 2 931,07 га (9,43%). Самыми распространенными типами объектов в данной категории являются участки дражной разработки (1 144,47 га), расположенные в пойме реки Ирелях и хвостохранилища (888,86 га).

Общая площадь нарушенных в процессе строительства и добычи полезных ископаемых земель составляет 1 154,11 га (3,71%). Как правило, данная группа земель примыкает к участкам, занятым горнодобывающей инфраструктурой.

Объекты жилой и промышленной застройки занимают 1727,60 га (5,56%). В основном это здания жилой малоэтажной и усадебной застройки, промышленные объекты, улично-дорожная сеть и зеленые насаждения в городской черте.

Полученные результаты в целом свидетельствуют о достаточно сильном техногенном влиянии на окружающую среду и высокой преобразованности коренных ландшафтов в пределах района работ.

2. В ходе анализа изменений (появление или исчезновение) антропогенных объектов (объекты недропользования, дороги, участки сейсмопрофилей, здания, сооружения) было выявлено 710 полигональных объектов общей площадью 188,2 га. Наибольшие трансформации связаны:

- с землями под производственной и хозяйственной застройкой: общая площадь — 47,15 га, из которых вновь появилось 78% объектов;

- со зданиями и сооружениями производственного и хозяйственного назначения: 42,46 га, из которых вновь появилось 70% объектов;

- с улучшенными грунтовыми дорогами — 35,66 га, из которых вновь появилось 87% объектов.

Несмотря на большое количество объектов (244), общая доля площади изменений жилых малоэтажных зданий невелика и составляет 8,7% всех полигональных изменений.

Отдельно были выявлены изменения (появление или исчезновение) 114 линейных объектов общей протяженностью площадью 40,8 км. Большая динамика характерна для сейсмопрофилей — 17,3 км, а также связана с увеличением числа и протяженности трубопроводов — 11 км. Также по аналогии с полигональными объектами можно выделить рост на 6,4 км протяженности грунтовых дорог, представленных в силу незначительной ширины линейными объектами (появилось 89% объектов).

Большинство изменений сконцентрированы в черте г. Мирного (рис. 5) и связаны со строительством или сносом жилых и промышленных зданий. В пределах лесных участков характерны изменения, связанные с появлением сейсмопрофилей и лесных грунтовых дорог.

3. Детальный анализ объектов инфраструктуры (карьеры, хвостохранилища, терриконы и отвалы) позволил выделить 88 объектов недропользования (5530,1 га). Треть общей площади (1877,9 га) занимают земли, нарушенные в результате дражной разработки россыпных месторождений алмазов. Более 20% от площади всех объектов занимают хвостохранилища фабрики №3 (законсервированное, к западу

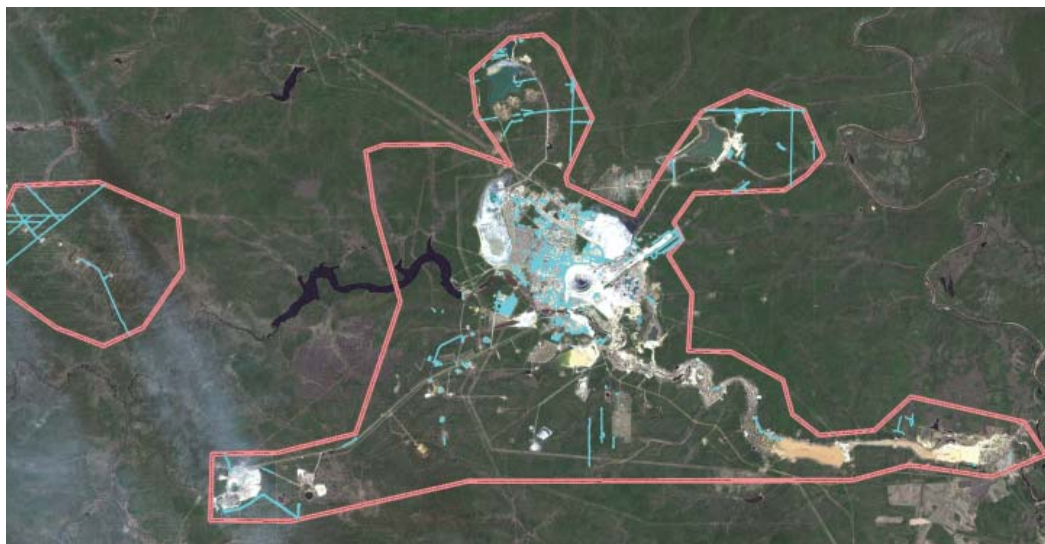


Рис. 5. Распределение изменений объектов недропользования, дорог, участков сейсмопрофилей, зданий, сооружений по территории работ (показаны голубым)

от фабрики, и действующее, к северу от фабрики). Значительную часть (19,5%) занимают поля дражной разработки, где добыча ведется в настоящее время либо велась в недавнем прошлом и следы добычи хорошо сохранились. Участки складирования породы (отвалы, терриконы) занимают около 10 % (556,8 га).

Большинство объектов недропользования локализованы на окраинах г. Мирного, на небольшом удалении находятся хвостохранилище фабрики №3, отстойники засоленных вод, поля дражной разработки, а также карьер, отвалы и рудник «Интернациональный». В западной части района выявлены локальные участки складирования вскрышных пород, образованные в процессе разведки нового месторождения.

За рассматриваемый период изменения коснулись 24 полигональных объектов недропользования общей площадью 435,9 га. Большая часть (60% — 263,8 га) площадных изменений

связана с расширением участков дражной разработки за 10 лет. Примерно одинаковые показатели динамики имеют хвостохранилища и карьеры (изменения составляют 16,1% и 15,3% соответственно) (рис. 6). При этом если для всех хвостохранилищ характерно увеличение площади, то для 4 из 7 выделенных карьеров фиксируется сокращение площади за счет прекращения добычи и естественного зарастания. Локализация изменений во многом соответствует расположению основных объектов недропользования.

4. Для построения растровых картосхем относительного содержания хлорофилла и мутности воды использовался снимок RapidEye за 10 июля 2014 г. Картосхемы строились по значениям коэффициента спектральной яркости на верхней границе атмосферы, что позволяет сравнивать значения, полученные в другое время с различных съемочных систем. Итоговые растры содержат значения яркости, соотношенные с предполагаемым картографируемым

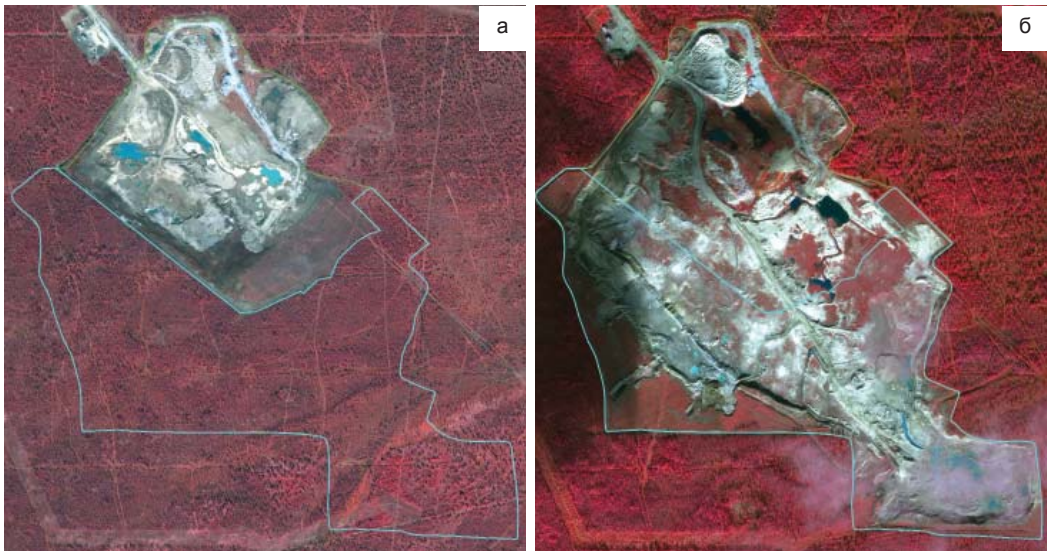


Рис. 6. Увеличение площади разработки карьера «Прикарьерный»: а) снимок QuickBird, 2004 г.; б) снимок GeoEye-1, 2014 г.

Тип водоема	Количество объектов	Мутность			Содержание хлорофилла		
		min	max	mean	min	max	mean
Водохранилище	1	0,027762	0,131456	0,034832	0,034558	0,099928	0,040354
Озеро или пруд	5	0,02996	0,077809	0,038847	0,039249	0,099824	0,04943
Речка	17	0,022526	0,179798	0,058039	0,02704	0,099998	0,058708
Технический водоем	239	0,028578	0,179977	0,060041	0,028296	0,099994	0,052743
Водопроявления	372	0,029791	0,179746	0,061712	0,031585	0,099995	0,063944

Табл. 2. Показатели мутности воды и концентрации хлорофилла для различных типов водных объектов

явлением (мутность и содержание хлорофилла).

Минимальные и максимальные значения показателей качества воды близки для всех объектов (табл. 2).

Средние значения мутности и концентрации хлорофилла самые низкие для Иреляхского водохранилища — распределение значений равномерно по зеркалу водохранилища, с некоторым ростом к берегу, а также в устьях впадающих в него ручьев. Ниже дамбы мутность воды в р. Ирелях высокая, а по течению реки сильно варьирует [7]. Это объясняет сильный

разброс средних значений на различных участках русла. Также невысокие показатели содержания взвешенных частиц характерны для естественных озер. Худшее состояние демонстрируют технические водоемы (хвостохранилища) (рис. 7), искусственные водоемы в пределах производственных объектов и водопроявления (поверхностные скопления вод). Однако разброс значений сильно различается по каждому из объектов; кроме того, для водопроявлений в среднем характерно более высокое содержание хлорофилла.

5. Тематическую группу участков водопроя-



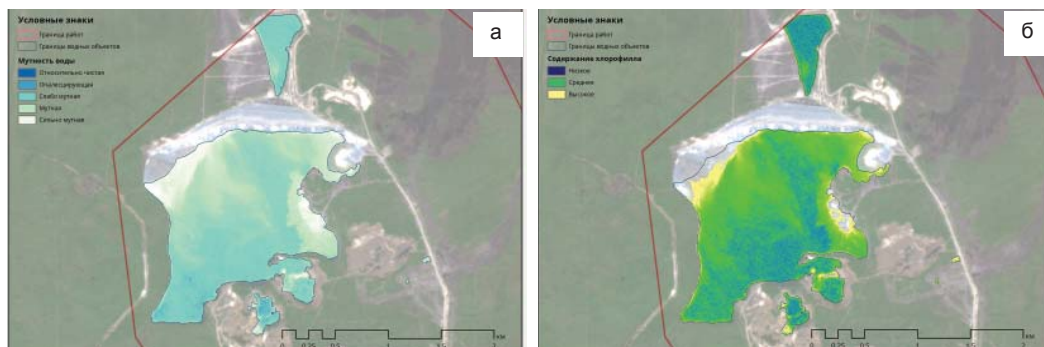


Рис. 7. Картограммы мутности воды (а) и содержания хлорофилла (б) в воде хвостохранилища фабрики №3

явлений и обводненности можно разделить на два класса: водопроявления и обводнения — скопления воды на поверхности, не отнесенные к водоемам, и заболоченные участки — временно или постоянно переувлажненные места и/или болота.

Для обнаружения водопроявлений производилось автоматическое выделение водных объектов по нормализованному индексу влажности (NDWI) [8]. Индексные изображения были рассчитаны для снимков RapidEye и GeoEye за 2014 г.

Всего было обнаружено 372 участка водопроявлений (общая площадь 123,4 га) и 35 участков заболочивания (общая площадь 190 га). Большая часть водопроявлений сосредоточена в местах бывших производственных объектов – на рекультивированных, нарушенных или заброшенных промышленных землях (рис. 8 а). Многочисленны водопроявления в естественных условиях (23%), а также в местах действующих производственных объектов (23%) и складирования отходов (11%). Нежелательные обводнения выявлены в непосредственной близости к объектам транспортной инфраструктуры (дороги, трубопроводы, линии ЛЭП) и составляют 14% от общего количества. Характер распределения заболоченных земель немного различается (рис. 8 б): более трети (35%)

участков связаны с транспортными объектами, 31% формируется в естественных или близким к ним условиях. В пойме реки образование заболоченных участков связано как с влиянием водохранилища и дражной разработки, так и с естественными причинами.

6. Картографический слой изменений почвенно-растительного покрова за 2004–2014 гг. включает в себя участки исчезновения и появления растительности. Для создания слоя было выполнено автоматическое дешифрирование растительности на разновременных снимках (методы Maximum Likelihood и Spectral Angle). Полученные покрытия растительности за 2004 и 2014 гг. были откорректированы вручную, путем визуального дешифрирования. Обнаружение изменений по двум разновременным растрам (2004, 2014 гг.) выполнялось с использованием алгебры карт. Корректировка полученных покрытий производилась визуальным способом.

По результатам анализа можно сделать вывод, что за 10 лет (с 2004 по 2014 г.) в районе работ произошел прирост растительности (общая площадь — 1326,3 га), что обусловлено в первую очередь процессами естественного лесовосстановления (зарастание вырубок под ЛЭП, заброшенных карьеров, дачных участков



Рис. 8. Распределение водопроявлений и обводнений (а) и заболоченных участков (б)



Рис. 9. Обнаружение участков исчезновения растительности: а) снимок QuickBird, 2004 г.; б) снимок GeoEye, 2014 г.; в) участки исчезновения растительного покрова

и т. д.). Площадь участков исчезнувшей растительности — 1061 га. Исчезновение растительности обусловлено главным образом антропогенной нагрузкой на территорию (сведение лесов под горнодобывающую инфраструктуру, гибель растительности вблизи отстойников минерализованных вод и участков прорыва пульпопроводов, строительство ЛЭП) (рис. 9).

7. Картографирование деградации лесной растительности выполнялось путем выделения различных классов состояния — растительность без признаков деградации, деградированная и погибшая.

Под деградированной растительностью понимается растительность, подвергшаяся антропогенному (разлив пульпы, увеличение площади отстойника минерализованных

вод) или природному (заболочивание, пожары) негативному воздействию, вызвавшему ее угнетение. Погибшая растительность — подвергшаяся антропогенному или природному негативному воздействию, вызвавшему ее полное усыхание и гибель.

Итоговый слой был получен на основе индексного изображения NDVI, созданного по данным снимкам RapidEye. Полученные контура корректировались на основе данных GeoEye и контуров базовой планово-картографической основы. В качестве дополнительного дешифровочного признака погибшей растительности выделялась текстура изображения сверхвысокого пространственного разрешения, характерная для областей скопления усохших стволов деревьев.

На исследуемой территории участки нарушенной растительности (деградированной и погибшей) занимают площадь, равную 1285 га. Из них 70% — участки деградированной растительности, 30% — погибшей. При этом участки деградации занимают 4% от общей площади, занятой лесами и древесно-кустарниковой растительностью, погибшей — 1,6%.

Анализ пространственного распространения участков погибшей и деградированной растительности показал, что основные площади нарушения растительного покрова приурочены к областям гарей, заболачивания, засоления почвенного покрова и расположены чаще всего в непосредственной близости от промышленных объектов (пульпопроводов, отстойников минерализованных вод, дорог и т. д.).

## ВЫВОДЫ

Таким образом, дистанционные методы экологической оценки состояния территории позволяют оперативно получать сведения о возможном негативном воздействии на окружающую территорию и своевременно принимать природоохранные меры. Доступ к архиву спутниковых снимков открывает широкие возможности для проведения ретроспективных исследований состояния экосистем, анализа динамики происходящих изменений.

В целом в ходе работ получены объективные сведения об изменениях, произошедших в Мирнинском районе промышленной разработки алмазов за десятилетний период (2004–2014). Полученные результаты составляют единую базу геоданных, которая может служить основой для мониторинговых исследований в будущем, а также использоваться для текущего анализа экологического состояния совместно с результатами наземных экологических изысканий.

Представляется важным продолжение и расширение подобных работ, в том числе на месторождениях в Республике Саха (Якутия), находящихся на начальных стадиях разработки (трубки «Нюрбинская», — Ботуобинская» и др.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Состояние наземных экосистем в районе деятельности горнодобывающих предприятий АК «АЛРОСА» (ОАО) / Я. Л. Вольперт, Е. Г. Шадрина, Г. Н. Саввинов и др. // Горный журнал. — 2012. — №2. — С. 84–87.*
2. Поздняков А. И., Вольперт Я. Л. *Анализ воздействия алмазодобывающей промышленности на окружающую среду Северо-Западной Якутии А. И. Поздняков, Я. Л. Вольперт // Проблемы региональной экологии. — 2008. — № 2. — С. 24–28.*
3. *Отчет по теме НИР: «Оценка современного состояния экосистем в зоне деятельности Мирнинского ГОКа» ФГНУ ИПЭС. — Якутск, 2011.*
4. Вольперт Я. Л. *Основные направления минимизации воздействия алмазодобывающей промышленности Якутии на окружающую среду Я. Л. Вольперт, Г. А. Мартынова // Горный журнал. — 2011. — №1. — С. 100–102.*
5. *Отчет по теме НИР: «Оценка современного состояния экосистем в зоне деятельности Мирнинского ГОКа» ФГНУ ИПЭС. Якутск, 2014.*
6. *Global Visualization Viewer. URL: <http://glovis.usgs.gov/> (дата обращения: 08.04.2015).*
7. Вольперт Я. Л. *Трансформация наземных экосистем в результате воздействия алмазодобывающей промышленности // Успехи современного естествознания. — 2012. — № 11 (1). — С. 80–82.*
8. MacFeeters S. K. *The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water feature // International Journal of Remote Sensing. — 1995. Т. 17. — №. 7. — С. 1425–1432.*