

УДК 528.8.04:622

**О КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
В РЕГИОНАХ С ВЫСОКОЙ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКОЙ**

В. Н. Опарин¹, В. П. Потапов², О. Л. Гиниятуллина²

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: oparin@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

²*Институт вычислительных технологий СО РАН, Кемеровский филиал,
E-mail: kembict@gmail.com,
ул. Рукавишниковая, 21, 650025, г. Кемерово, Россия*

Отражены опыт комплексной оценки состояния окружающей среды в районах с высокой техногенной нагрузкой на основе данных дистанционного зондирования Земли, а также основные подходы к обработке космоснимков и последовательность анализа природных компонентов. В качестве примера дана оценка состояния одного из угледобывающих районов Кузбасса.

Дистанционное зондирование Земли, комплексная оценка, экологический мониторинг

ВВЕДЕНИЕ

При современных темпах антропогенного воздействия на окружающую среду, особенно в регионах с высокой техногенной нагрузкой в результате добычи полезных ископаемых, требуются новые методы оценки состояния и охраны природных объектов. Международное право охраны окружающей среды определяет совокупность норм и принципов, регулирующих отношения в сфере защиты окружающей среды в целях охраны и рационального использования природных ресурсов [1].

В настоящее время международное сотрудничество в этом направлении осуществляется в двух аспектах: 1) создание норм, охраняющих отдельные природные объекты; 2) осуществление надзора государства или международной организацией за тем, чтобы та или иная деятельность проводилась с учетом соответствующих последствий для окружающей среды.

Как правило, государства стремятся обеспечивать выполнение норм, направленных на охрану отдельных природных объектов. Это становится “стандартом” де-факто для успешного позиционирования добываемой продукции на мировом рынке. Особенно проблемным является осуществление второго направления международного сотрудничества для стран с большим территориальным охватом и сложным природно-техногенным ландшафтом, поскольку при оценке влияния горнопромышленных регионов на окружающую среду недостаточно приводить результаты мониторинга только одной из составляющих, например водных объектов. При добыче полезных ископаемых происходит комплексное воздействие на окружающую среду: водный ре-

жим, растительность, атмосферу, почву. Учитывая тесную взаимосвязь данных объектов, при определении экологического мониторинга контролируемого региона необходимо проводить комплексный анализ и оценку состояния природных объектов, их взаимное влияние.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ: ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Одной из ключевых задач при проведении экологического мониторинга является определение источников данных и выбор методов их обработки. Традиционно применяют методы полевых исследований (отбор проб, составление гербариев, тематических карт и т. п.) и моделирование процессов в лабораторных условиях [2–4]. Однако при этом возникают ограничения по количеству сделанных замеров, характеру и доступности мест обследования, а также частоте повторяемости обследования. Как правило, результаты полевых исследований характеризуют контролируемые события в единичный момент времени и в дискретном пункте (одной “точке”).

Моделирование изучаемых природных процессов в лабораторных условиях опирается на данные полевых исследований и зависит от адекватности выбранной модели. Еще сравнительно недавно этот подход был практически единственным при осуществлении экологического мониторинга горнодобывающих районов.

В последние годы активно развиваются методы дистанционного экологического мониторинга, основанные на применении в качестве источников информации данных измерений с космических аппаратов в активном и пассивном режиме съемки. Использование данных дистанционного зондирования Земли позволяет исключить такие существенные недостатки традиционных методов исследования, как:

— *ограничение по площади и доступности*, так как в один “момент” времени фиксируется информация, относящаяся к десяткам и сотням квадратных километров;

— *повторяемость результатов* — съемка территории совпадает с траекторией движения спутника;

— *ограничение исследований по погодным условиям* — для космических аппаратов с активным режимом съемки влияние атмосферы и погодных условий практически сведено к минимуму;

— *разнородность данных* — по одним и тем же снимкам можно проводить оценку различающихся по природе объектов (водные бассейны, растительность, почвы) и устанавливать возможные взаимосвязи влияния одних на другие [2–8].

При проведении комплексной оценки геоэкологического состояния горнодобывающих регионов наиболее полную информацию обеспечивает массив данных дистанционного зондирования Земли, состоящий из мультиспектральных радиолокационных снимков среднего (50–10 м в пикселе) и высокого (10–5 м в пикселе) разрешения, основные характеристики которых представлены в таблице.

Как показали многочисленные эксперименты [3, 6, 7, 9], минимальным временным интервалом для исследования техногенных воздействий от добычи полезных ископаемых на окружающую среду является период в 5 лет. Именно этот период позволяет отслеживать изменения в окружающей среде и исключать влияние случайных климатических факторов (засуха или обилие дождей и др.). Мультиспектральные космические снимки дают возможность восстановить исходные физические показатели контролируемых объектов и оценить состояния представляемых ими таких природных объектов, как водная сеть, растительность, почва, а также устанавливать возможные взаимосвязи между состояниями этих объектов.

Основные характеристики космических снимков, используемых в задачах геоэкологического мониторинга горнодобывающих районов [7–9]

Тип спутника	Спутник	Радиометрическое разрешение, бит на пиксель	Пространственное разрешение, м	Режим съемки / спектральный диапазон
Multispectral image	Landsat 7–8; SPOT 4, 6–7; RapidEye; WorldView-2 и др.	8–12	0.46–30	VNIR 0.40–1.40 мкм PAN 0.48–0.90 мкм TIR 10.40–12.50 мкм
Radar image	Cosmo-SkyMed 1–4; ALOS (PALSAR) и др.	5–8	3–22	X-диапазон 3.1 см L-диапазон 23.5 см

Основное направление практического применения радарных снимков в горном деле заключается в определении изменений поверхности Земли: выявление зон локализации деформаций, образования мульд сдвига и зон проседания подрабатываемых толщ породных массивов. Следует отметить, что при исследовании состояния контролируемой системы лишь по одному типу информационных данных, например по космическим мультиспектральным снимкам, не всегда возможно дать адекватную оценку наблюдаемому процессу, установить причины его возникновения.

Характерный пример — процесс угнетения растительности вдоль речного русла, проходящего вблизи борта угольного разреза. Несомненно, что одним из основных влияющих факторов здесь является увеличение в водной среде загрязняющих веществ, смываемых с бортов угольного разреза. Однако собственно зона “поражения” существенно превышает по размерам очаговую зону непосредственного воздействия на речную сеть. Контроль региона в целом по радарным космическим снимкам показывает, что на растительность влияет также процесс деформирования поверхности Земли в результате нарушения целостности массива от ведения горных работ. Это приводит к увеличению депрессионной воронки, приуроченной к речному руслу. В результате данного воздействия корни растений перестают получать обычное для данного места водное питание, что отражается на общем количестве зеленой биомассы.

Отмеченные обстоятельства позволяют предложить следующую методику комплексной оценки экологического состояния горнодобывающих районов по данным дистанционного зондирования Земли, состоящую из информационных блоков анализа для трех природных компонентов: “вода – растительность – поверхность Земли” (рис. 1).

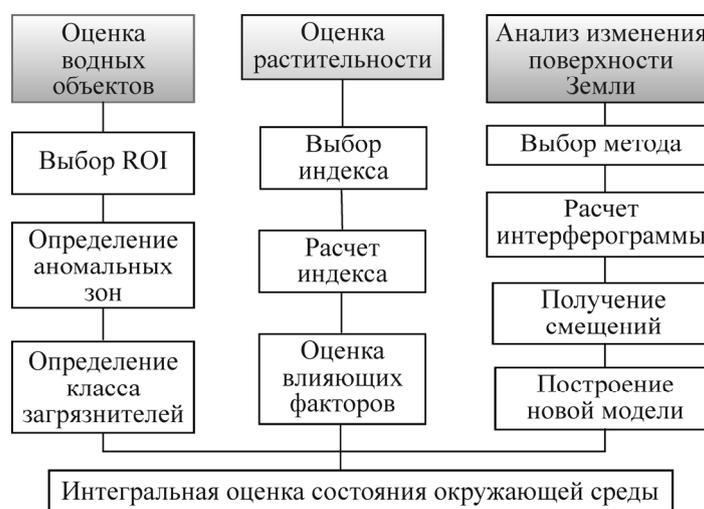


Рис. 1. Этапы проведения геоэкологического обследования горнодобывающих регионов по данным дистанционного зондирования Земли

Как показывает опыт проведения геоэкологического мониторинга [3, 6, 8, 9], наиболее удобно начинать процесс исследования с “водных объектов”. Именно водная среда является важнейшим индикатором антропогенного воздействия на окружающую среду. Тесная взаимосвязь компонентов “вода – растительность – почва” позволяет рассматривать водную среду главным компонентом, оказывающим основное влияние на состояние системы в целом.

Выбор водных объектов для анализа может осуществляться экспертом, который указывает возможные аномальные зоны либо с применением алгоритмов обработки текстур и текстурных признаков по методу Р. М. Харалика [9–11], которые позволяют выделить объекты с отклонением в спектральной яркости, отличным от природного состояния среды, либо оценка состояния объектов по снимкам осуществляется с применением кривых спектральной яркости.

Спектральные свойства объектов при съемке в оптическом диапазоне характеризуются коэффициентами интегральной и спектральной яркости. Коэффициент интегральной (ахроматической) яркости, или коэффициент яркости (r), — это отношение интегральной яркости отражающей поверхности (B) к яркости идеально рассеивающей или полностью отражающей поверхности (B_0) при одинаковых условиях освещения $r_0 = B / B_0$. При этом яркости должны быть измерены в одном и том же направлении, чтобы исключить влияние неравномерности отражения в пространстве. Коэффициенты интегральной яркости природных образований изменяются от 1.0 для свежеснеженного снега до 0.03 для влажного чернозема. Несмотря на достаточно большой интервал изменений этого коэффициента, охарактеризовать можно сравнительно небольшое число оптически нейтральных объектов — белых и черных. Большинство природных образований обладают различиями не в интегральной, а в спектральной отражательной способности — по-разному отражая солнечное излучение в различных участках спектра электромагнитных колебаний. Для характеристики отражательных свойств объектов используют коэффициент спектральной яркости в виде отношения монохроматических яркостей $r_\lambda = B_\lambda / B_0$.

Построение спектральных кривых позволяет количественно оценивать такие характеристики физического состояния водных объектов, как мутность среды, наличие возможных загрязнителей [12]. На загрязнение водных объектов большое влияние оказывает талая вода. Снежный покров обладает свойством интегрального накопления загрязняющих веществ, которые адсорбируются на поверхности кристаллов в процессе их выпадения, поэтому может использоваться в качестве планшета-индикатора загрязнения подстилающей поверхности. Аккумулируемые в снежном покрове ингредиенты сохраняются до снеготаяния и несут в себе значительную геохимическую информацию.

В районах действия техногенных источников загрязненный снежный покров позволяет оценить химический состав атмосферных выпадений, их интенсивность, выявить ареалы рассеяния и вместе с данными космической съемки получить информацию о степени загрязнения снежного покрова вблизи промышленных центров. Накопление загрязняющих веществ в снежном покрове зависит от климатических условий на данный период, свойств подстилающей поверхности, типа почв и горных пород, рельефа, наличия растительности и локальных техногенных источников. Накопленные в снежной толще загрязняющие вещества в период таяния увеличивают концентрации в весеннем стоке, попадая в дождевую канализацию и водоемы. Это может быть причиной загрязнения и питьевых вод. Известно, что концентрация загрязняющих веществ в атмосфере, поступающих от источников, резко убывает с увеличением расстояния от источника. Аналогичная картина содержания и изменения наблюдается в снежном покрове.

Загрязнение снега существенно влияет на яркость изображения на космических снимках, что дает возможность совместно с результатами обработки проб снега картографировать площади и интенсивность загрязняющих воздействий. Наибольшие различия в характеристиках снежного

покрова загрязненных территорий и на фоновых территориях отмечаются весной, хотя формируются они в зимний период. При снеготаянии эти контрасты становятся более выраженными за счет накопления загрязняющих веществ, вытравливаемых из снега [7]. Для выделения ареалов с различными свойствами снежного покрова по космическим снимкам применяются данные полевых спектрометрических исследований, позволяющие разделять снег по цветности, и достаточно большой перечень спектральных индексов (NDVI, NDSI, NDWI), избирательно чувствительных к содержанию воды в снеге, уровню запыленности, плотности и другим характеристикам.

Отдельно следует упомянуть о направлении исследований, связанных с применением цифровых моделей рельефа местности для устранения влияния неровностей поверхности на освещенность снега, а также для расчета устойчивости снежной массы. Таким образом, существующие методические наработки позволяют выявлять пространственные неоднородности снежного покрова и на качественном уровне оценивать степень запыленности снега для горизонтальных и наклонных поверхностей [13–14].

Для выделения территорий, покрытых снегом, авторами предлагается использовать нормализованный дифференциальный индекс снега NDSI. NDSI — это относительная величина, характеризующая различие отражательной способности снега в красном ($0.66\mu m$) и коротковолновом инфракрасном ($1.6\mu m$) диапазонах:

$$NDSI = \frac{\rho(0.66\mu m) - \rho(1.6\mu m)}{\rho(0.66\mu m) + \rho(1.6\mu m)}.$$

Для снега $NDSI > 0.4$. Основные факторы, влияющие на коэффициент спектральной яркости (КСЯ) снега — это влажность, загрязненность, размер зерен, плотность снега.

Увеличение влажности снега сопровождается увеличением размера зерен и плотности снега. При этом КСЯ снега уменьшается вследствие увеличения поглощения водой и уменьшения роли многократного рассеяния. Загрязненность снега также приводит к уменьшению коэффициента яркости. Существует зависимость между уменьшением зональных яркостей загрязненного снежного покрова и концентрациями в нем некоторых загрязняющих веществ.

Спектральный ход кривой льда аналогичен спектральной зависимости кривой снега, однако для льда характерны более низкие значения спектральной яркости и более динамичное уменьшение ее при увеличении загрязненности. Ввиду высоких значений показателя поглощения воды в ИК-диапазоне для кривой спектральной яркости снега характерны очень низкие значения. Резкое уменьшение значений яркости снега в ИК-диапазоне по сравнению с оптическим обуславливает возможность идентификации облачности и снега на основе совместного использования снимков в этих диапазонах [12]. Излучательная способность снега в ИК-диапазоне, напротив, приближается к единице и, следовательно, интенсивность его собственного излучения определяется главным образом температурой [13].

При оценке состояния растительности по снимкам используются интегральные характеристики, выраженные в виде вегетационных индексов. В настоящее время известно около 160 вариантов индексов. Они подбираются экспериментально (эмпирическим путем), исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв. Расчет базируется на двух наиболее стабильных участках кривой спектральной отражательной способности растений: на красную зону спектра ($0.62–0.75$ мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону ($0.75–1.3$ мкм) — максимальное отражение энергии клеточной структурой листа [15, 16]. То есть высокая фотосинтетическая активность, связанная с большой фитомассой растительности, ведет к более низ-

ким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной. В зависимости от зоны исследования могут применяться как классический нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) для анализа зон обычной растительности, так и почвенный вегетационный индекс (Soil Adjust Vegetation Index, SAVI) и нормализованный разностный инфракрасный индекс (Normalized Difference Infrared Index, NDII) для анализа таких горных объектов, как отвалы, шахтные терриконы и т. п., — объектов с нарушенным плодородным слоем и бедной зеленой массой.

Наиболее трудоемким этапом геоэкологического мониторинга как при использовании традиционных методов, так и при дистанционном исследовании является определение изменений поверхности горного региона. Радарные снимки и методы радиолокационной интерферометрии позволяют увидеть практически любые структурные изменения, которые происходят на поверхности Земли. Так, дифференциальная интерферометрия позволяет определять и отслеживать на малых масштабах вертикальные и горизонтальные смещения земной поверхности. Самый простой способ оценки смещений и временных изменений состоит в использовании пары радарных спутниковых изображений, сделанных с некоторым интервалом времени [17, 18].

Структурные изменения земной поверхности на интерферограммах обычно представлены в виде колец, с переходами от красного к синему цвету (изменения фазы от $-\pi$ до π). Каждый такой переход соответствует смещениям земной поверхности, равным половине длины волны радиолокатора. С помощью методов радиолокационной интерферометрии осуществляется построение цифровых моделей рельефа и строятся карты вертикальных смещений поверхности. По данным обработки нескольких пар снимков можно оценить динамику изменений поверхности Земли, что важно при количественной оценке деструктивного влияния ведения горных работ как с геомеханико-геодинамических, так и геоэкологических позиций.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО РАЙОНА КУЗБАССА

Приведем пример оценки состояния окружающей среды горнодобывающего региона по данным дистанционного зондирования Земли. В качестве объекта исследования выбрана территория угледобывающего региона г. Полысаево в Кемеровской области (рис. 2). На рис. 2 цифрами обозначены первичные объекты мониторинга — водные. Часть из них являются антропогенными озерами, ряд точек представлены по току русла р. Иня.

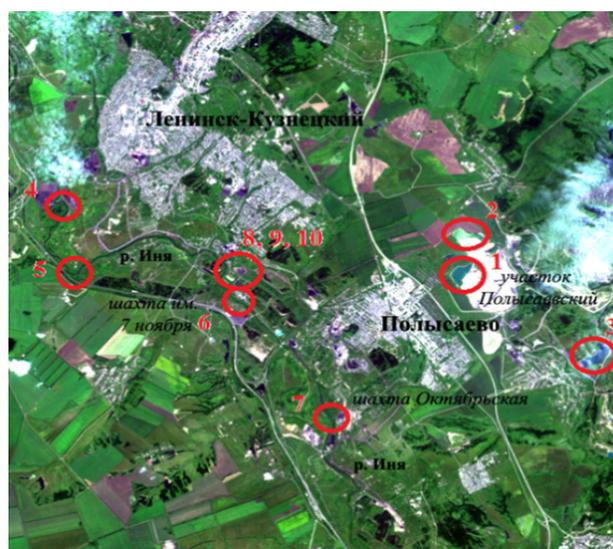


Рис. 2. Зона проведения дистанционного геоэкологического мониторинга

На рис. 3 приведены спектральные кривые для оценки физических свойств выбранных объектов.

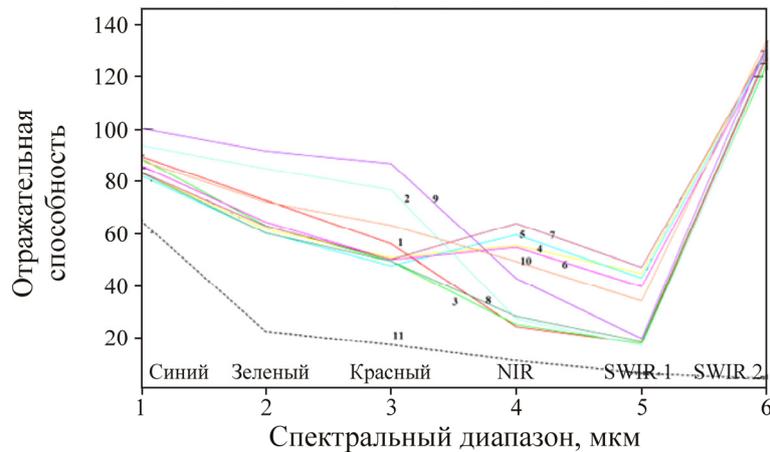


Рис. 3. Спектральные кривые для водных объектов: 1–3 — озера; 4–7 — реки; 8–10 — техногенные водоемы; 11 — оз. Байкал (вблизи заповедника)

Для экологической оценки состояния контролируемых объектов необходимо ввести соответствующий эталон чистой водной среды. В качестве такого взята спектральная кривая по оз. Байкал в заповедной зоне, который является мировым эталоном чистой питьевой воды. Поскольку водные объекты оцениваются в реальных природных условиях, использование спектральной кривой для дистиллированной воды недопустимо. Из рис. 3 видно, что все спектральные кривые по водным объектам контрольного региона лежат выше эталонной кривой. Это свидетельствует о наличии активного антропогенного воздействия на геосреду. Как показывают исследования [6, 8, 19], подтвержденные также лабораторными данными проб воды, наличие в водной среде взвешенных частиц увеличивает отражательную способность в ИК-зоне спектра, органических веществ — в средней ИК-зоне [9]. Примечательно, что между спектральными кривыми озер и рек существует принципиальное различие: для закрытых водоемов характер кривой плавный, со снижением значения отражения при увеличении длины волны, а для объектов с активным током характерен резкий рост значений в зонах NIR и SWIR электромагнитного спектра.

Подобная ситуация обусловлена тем, что именно эти две зоны очень чувствительны к наличию примесей, растворенных в водной среде. В закрытых водоемах подобные включения имеют тенденцию к оседанию на дно, в то время как в объектах с активным током идет постоянное перемешивание частиц в силу природных физических факторов, которые вызывают соответствующий скачок в отражательной способности электромагнитных волн. Таким образом, наибольшее количество загрязняющих веществ (органических и неорганических) содержится в русле р. Иня (№ 7). При этом наибольшая их концентрация достигается вблизи завода и шахты Октябрьская, а на озере № 2 наблюдается цветение водорослей, вызванное увеличением объема фитопланктона, который регистрируется в зеленой зоне (чем сильнее отражение, тем больше фитопланктона в воде) и в красной (хлорофилл фитопланктона поглощает излучение и вызывает понижение яркости).

При оценке влияния загрязнителей снега на общую картину экологического состояния района взята зимняя съемка региона со спутника Landsat 7 (рис. 4). По результатам расчета индекса снега NDSI установлены наиболее загрязненные участки контролируемого региона, которые являются санитарной зоной завода, наиболее чистые области выделены вдоль р. Иня.

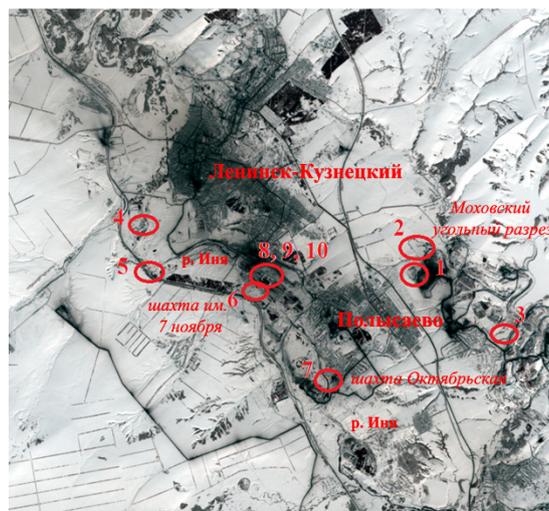


Рис. 4. Оценка снежного покрова угледобывающего региона

Снижение уровня загрязнения окружающей среды на территории г. Полысаево наблюдалось в 2012–2013 гг. Это видно по результатам исследования дистанционного мониторинга водных объектов и снежного покрова, а также подтверждено данными лабораторных исследований проб воды и снега. Следовательно, можно говорить о достоверности предложенной методики, анализа и интерпретации данных дистанционного экологического мониторинга.

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО РЕГИОНА

Для дистанционного контроля динамики изменения структуры земной поверхности применялись шесть пар радарных снимков (ALOS PALSAR и Cosmo SkyMed). Обработка космических снимков проводилась в программном комплексе SARscape 5.0. Данные изображения покрывали площадь $40 \times 40 \text{ км}^2$. Первый этап обработки исходной информации — построение дифференциальной интерферограммы. В результате получено 6 интерферограмм, позволивших выделить отдельный район между городами Полысаево и Ленинск-Кузнецкий, в котором регистрируются постоянные смещения земной поверхности в течение последних 5 лет (рис. 5).

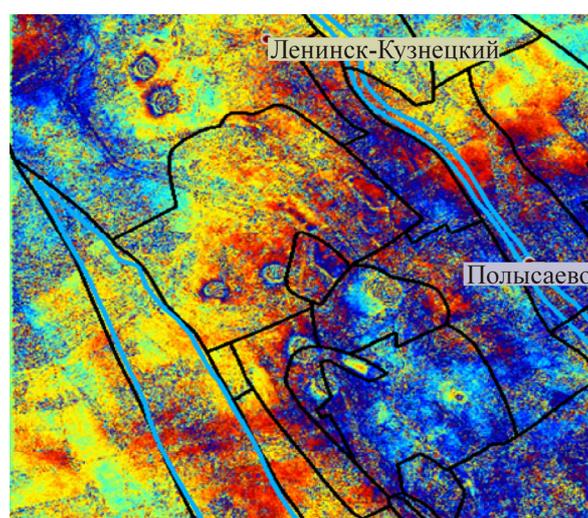


Рис. 5. Дифференциальная интерферограмма для района между городами Полысаево и Ленинск-Кузнецкий. Черными полосами выделены участки шахтных полей и разрезов, синими — зоны дробления

Из рис. 5 видно, что структурные изменения регистрируются на территориях, где осуществляются горные работы. Примечательно, что в сейсмоопасных районах Кузбасса наблюдается расширение зон смещений земной поверхности. Для оценки вертикальных смещений построена цифровая модель рельефа контролируемой части земной поверхности и проведено сравнение выделенных рельефных форм по годам (рис. 6).

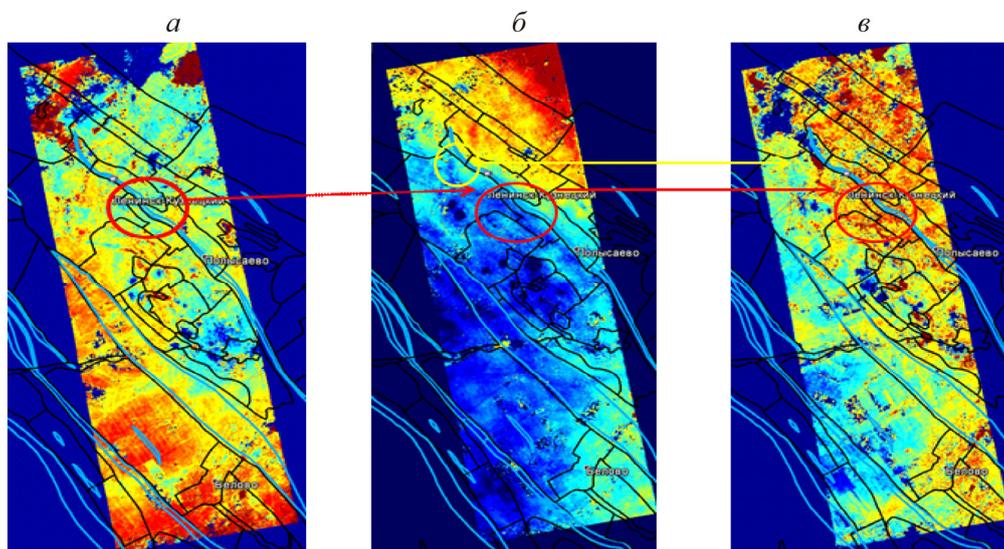


Рис. 6. Карты вертикальных смещений по данным Cosmo SkyMed за 2011 – 2013 гг.: *а* — период 14.08.11 – 22.08.11; *б* — 15.07.12 – 23.07.12; *в* — 16.06.13 – 24.06.13. Черными полосами выделены участки шахтных полей и разрезов, синими — зоны дробления

Ниже представлены рассчитанные значения вертикальных смещений, м:

	2011 г.	2012 г.	2013 г.
Min	-0.038388	-0.042460	-0.031048
Max	0.031386	0.031954	0.027881

Согласно приведенным на рис. 6 картам смещений, наибольшие и наименьшие (экстремальные) значения смещений контролируемой поверхности Земли были зафиксированы в 2012 г. На выделенных участках красными кругами (с 2011 по 2013 г.) постоянно регистрируются отрицательные значения вертикальных смещений земной поверхности. В 2012 г. появился новый участок с отрицательными смещениями (рис. 6б, выделено желтым цветом).

Если совместить полученные данные цифровой обработки радарных снимков с проведенными результатами исследований, то можно отметить их совпадение в “ключевых точках”. Таким образом, имеем интегральную картину состояния окружающей среды с местами концентрации горного производства. Они являются центрами аномальных зон с значительными отклонениями в состоянии природных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях высоких темпов роста и объемов добычи и потребления минерального сырья в странах-лидерах мировой экономики долговременная стратегия развития горнодобывающей промышленности должна строиться с учетом роста техногенной нагрузки на экосистемы. Поэтому актуальность решения проблемы сохранения среды обитания растительного и животного мира в районах с высокой техногенной нагрузкой с годами будет только возрастать.

Сопутствующие этой жизненно важной для человечества деятельности по недропользованию нередко связаны с деструктивным началом для геоэкологии не только в пределах разрабатываемых горных отводов и горно-обогатительных комплексов, но и далеко за их пределами. **Во многом это “деструктивное начало” обусловлено “модуляцией” геоэкологических процессов, геомеханико-геодинамическими процессами как внутри, так и на поверхности Земли из-за ведения горных работ и индуцируемых ими движениями структурных отдельных частей самой верхней части земной коры, соразмерных образующимся подземным и наземным полостям при извлечении полезных ископаемых [20–25].**

В этом аспекте развитие методологических основ и их методического наполнения для осуществления комплексного крупномасштабного геоэкологического мониторинга является не только важной задачей успешного развития горнодобывающих регионов России, но и необходимой предпосылкой для облагораживания поверхности земли [26] после завершения ведения горных работ на конкретных территориях.

ВЫВОДЫ

Применение методов дистанционного зондирования Земли позволяет получать достоверную и актуальную информацию по экологическому состоянию горнодобывающих районов. Предложен новый подход к комплексной оценке состояния окружающей среды на примере угольных районов Кузбасса, который может не только оперативно отслеживать степень влияния антропогенной деятельности на экологическое состояние горнодобывающего региона, но и выделять аномальные зоны, обеспечивая тем самым возможность принятия своевременных решений по локализации данного вида воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазыкин А. В. Экологическое право. — М.: ЭКСМО, 2008.
2. Копесну G. Geoinformation. Remote sensing, photogrammetry and geographic information systems, London, New York: Taylor&Francis, 2003.
3. Purkis S., Klemas V. Remote sensing and global environmental change, UK, USA: Wiley-Blackwell, 2011.
4. Wang Y. Remote sensing of coastal environments, USA, 2010.
5. Толмачева Н. И. Космические методы исследований в метеорологии. Интерпретация спутниковых изображений. — Пермь: ПГНИУ, 2012.
6. Дейвис Ш. М., Ландгребе Д. А., Филлипс Т. Л. Дистанционное зондирование: количественный подход. — М.: Недра, 1983.
7. Рис У. Г. Основы дистанционного зондирования. — М.: Техносфера, 2006.
8. Шовенгерд Р. А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. — М.: Техносфера, 2010.
9. Haralick R. M., Shanmugam K., and Dinstein I. Textural features for image classification, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1973, Vol. 3.
10. Znu C., Yang X. Study of remote sensing image texture analysis and classification using wavelet, International Journal of Remote Sensing, 1998, Vol. 19, No. 16.
11. Liano K., Xu S., Wu J., and Zhu Q. Spatial estimation of surface soil texture using remote sensing data, Soil Science and Plant Nutrition, 2013, Vol. 59, No. 4.
12. Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Андреева Н. В. Мониторинг загрязнений водного бассейна районов активной угледобычи с использованием данных дистанционного зондирования // ФТПРПИ. — 2012. — № 5.

13. **Чепелев О. А., Ломиворотова О. М., Украинский П. А., Терехин Э. А.** Изучение связи запыленности снега с его спектральной отражательной способностью // Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов. — 2010.
14. **Gareth Rees W.** Remote sensing of snow and ice, Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2006.
15. **Лупян Е. А., Саворский В. П.** Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — № 2. — Т. 9.
16. **Черепанов А. С.** Вегетационные индексы // Геоматика. — 2011. — № 2.
17. **Потапов В. П., Миков Л. С.** Разработка элементов геоинформационной системы обработки радарных данных для задач горнопромышленного региона // ГИАБ. — М.: Горная книга, 2013.
18. **Narayanan P.** Basic of interferometry, Sydney: Academic Press, 2007.
19. **Дешифрирование** многозональных аэрокосмических снимков. Методика и результаты. — М.: Наука, 1982.
20. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // ФТПРПИ. — Ч. I. — 2012. — № 2; Ч. II. — 2013. — № 2; Ч. III. — 2014. — № 4.
21. **Бычков И. В., Опарин В. Н., Потапов В. П.** Облачные технологии в решении задач горной информатики // ФТПРПИ. — 2014. — № 1.
22. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Попов С. Е., Замаев Р. Ю., Харлампенков И. В.** Разработка распределенных ГИС-средств мониторинга миграций сейсмических проявлений // ФТПРПИ. — 2010. — № 6.
23. **Опарин В. Н., Козырев А. А., Сашурин А. Д. и др.** Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
24. **Опарин В. Н.** Методологические основы построения многослойных мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности для горнодобывающих районов в тектонически активных зонах // Проблемы и пути инновационного развития горнодобывающей промышленности: материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. (9–11 сентября 2013 г.). — Алматы, 2013.
25. **Потапов В. П., Опарин В. Н., Логов А. Б., Замаев Р. Ю., Попов С. Е.** Геоинформационная система регионального контроля геомеханических ситуаций на основе энтропийного анализа сейсмических событий (на примере Кузбасса) // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
26. **Опарин В. Н.** Фундаментальные проблемы облагораживания поверхности Земли в условиях высокой техногенной нагрузки // Сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием “Глубокие карьеры” (18–22 июня 2012 г.). — Апатиты; СПб., 2012.

Поступила в редакцию 29/X 2014