

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

УДК 504.5:528.8:622

ОЦЕНКА ПЫЛЕВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ КУЗБАССА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

**В. Н. Опарин¹, В. П. Потапов², О. Л. Гиниятуллина²,
Н. В. Андреева², Е. Л. Счастливец², А. А. Быков²**

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Институт вычислительных технологий СО РАН, Кемеровский филиал,
ул. Рукавишниковая, 21, 650025, Кемерово, Россия

Рассмотрены вопросы оценки состояния снегового покрова и загрязнения атмосферы в районах с интенсивной угледобычей. Предлагается использование данных дистанционного зондирования Земли за зимний период времени, при этом снеговой покров выступает в качестве планшета-индикатора загрязнения подстилающей поверхности. Приведены результаты оценки данных по качеству снега на площади порядка 100 км² в одном из районов Кузбасса.

Добыча угля, данные дистанционного зондирования, космоснимки, геоэкологический мониторинг, загрязнение атмосферы, выпадения, снеговой покров, анализ спектральной отражательной способности

В современных условиях расширяющегося крупномасштабного горного производства в Сибири придается значительное внимание изучению сопутствующих, нередко неблагоприятных последствий на среду обитания человека, животного и растительного мира. Нередкими становятся и геодинамические события, обусловленные развитием деструктивных процессов внутри массивов горных пород из-за выноса извлекаемых полезных ископаемых на поверхность Земли и оставление в ее недрах всевозрастающих по объему техногенных пустот [1].

Естественно, что в таких условиях становится уже практически трудно осуществимым или невозможным решение задачи инструментального мониторинга сложных и нередко взаимообусловленных процессов в твердой, жидкой и газообразной оболочках активно осваиваемых территорий Сибири без привлечения современных геоинформационных методов дистанционного зондирования Земли [2–8].

Во многих районах Кузбасса сконцентрированы угледобывающие предприятия, оказывающие негативное техногенное воздействие на состояние окружающей среды. При оценке допустимости воздействия отдельного предприятия на природные комплексы проводится государственный мониторинг окружающей среды, в том числе — загрязнения атмосферы [9]. Для

таких предприятий размеры санитарно-защитных зон (СЗЗ) обязаны обеспечивать уменьшение воздействия их выбросов на загрязнение атмосферного воздуха как до гигиенических нормативов (ПДК), так и до величин приемлемого риска для здоровья населения [10]. При этом проверка уровня воздействия осуществляется с помощью нормативных расчетных моделей максимального [11] и среднегодового [12] загрязнения атмосферы. Влияние других источников — как удаленных, так и близкорасположенных предприятий — учитывается фоновой концентрацией, определяемой территориальным подразделением Росгидромета.

При осуществлении проектных работ главным критерием “правильности” проведения расчетов является выполнение требований нормативных документов. Для научных исследований представляет наибольший интерес решение вопроса о соответствии расчетных значений и данных натурных наблюдений.

Согласно расчетным моделям [11, 12], таковыми наблюдениями должны являться данные стационарных постов, измеряющих концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) по несколько раз в сутки на протяжении продолжительного времени (год, сезон). Тогда в точке расположения поста максимальные расчетные концентрации ЗВ можно сравнивать с 2 % квантилем распределения измеренных веществ, а средние концентрации — со средними. Однако такие посты (принадлежащие Росгидромету) расположены только в крупных городах, а эпизодические пробы воздуха, проводимые за пределами СЗЗ предприятий без синхронного контроля условий распространения ЗВ и актуальных значений выбросов, представляются малоинформативными.

В природе существуют естественные аккумуляторы атмосферных ЗВ, позволяющие косвенно оценить долговременное воздействие промышленных выбросов. В теплый период это растительность, а в зимнее время — снеговой покров. Пробы анализируются в лабораторных условиях, определяется количество ЗВ, их концентрация, сухой остаток и т. п. Однако это дает только дискретные значения контролируемых величин в точках отбора и позволяет сделать только косвенные выводы о полноте учета источников загрязнения в исходных данных расчетов.

Для сопоставления расчетных и измеренных величин в расчете должны быть учтены все основные источники выброса в атмосферу, в зону влияния которых попадают экспериментальные точки. Известно, что в промышленных районах ближе к весне, после начала снеготаяния, нетрудно заметить значительное потемнение снега вблизи мощных источников выброса, являющееся следствием проявления накопившихся за зиму пылевых частиц, выпадающих из атмосферы. Данные дистанционного зондирования дают полную картину потемнения снега вокруг всех источников загрязнения, попавших в поле зрения снимка. Этот достаточно простой и достоверный метод определения местоположения новых и корректировки существующих источников выброса позволяет провести сравнительную оценку интенсивности загрязнения снега и, как следствие, мощности источников пылевых выбросов. Более того, установление связи запыленности снега с его спектральной отражательной способностью дает возможность проводить и количественные оценки.

Выбросы зачастую содержат высокотоксичные вещества (тяжелые металлы, оксиды серы, диоксины, полициклические углеводороды и др.). Выявление подобных загрязнений способствует принятию своевременных мер по обеспечению экологической безопасности. Непосредственно атмосферные выбросы детектируются космическими методами далеко не всегда. Но анализ состояния снегового покрова в зимний период позволяет определять ареалы загрязнений и проводить оценку экологической ситуации [13]. Для оценки соответствия работы компании экологическим стандартам и нормативам, а в случае аварии — для оценки площади загрязнения и выработки мер по его ликвидации — необходима система оперативной оценки со-

стояния территории, позволяющая своевременно и точно определять места загрязнения и координировать работу соответствующих служб, ответственных за ликвидацию последствий [14]. Именно применение космоснимков дает возможность оперативно получать данные о формировании аномальных зон, на которые следует уделить внимание лицам, принимающим решения.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СНЕГОВОГО ПОКРОВА ПО КОСМОСНИМКАМ

Загрязнение снегового покрова можно успешно выявлять на космических снимках высокого разрешения. В то же время для оценки состояния снегового покрова в масштабе горнопромышленного района можно использовать также снимки среднего пространственного разрешения. Наземные аналитические исследования показали, что плотность тона изображения ареала загрязнения коррелирует с содержанием загрязняющих веществ, что позволяет проводить не только качественный, но и количественный анализ состояния загрязненных территорий. Пятна загрязнения имеют размытые границы и специфическую форму, связанную прежде всего с розой ветров.

Практическое использование результатов дистанционного зондирования для мониторинга окружающей среды определяется возможностью установления связей параметров, характеризующих состояние контролируемого объекта, с полем уходящего излучения. Важным свойством снегового покрова, обеспечивающим его дешифрирование на спутниковых изображениях, являются его высокие альbedo и спектральные коэффициенты яркости (СКЯ) [15].

Атмосфера и земная поверхность представляют собой совокупность элементов, различающихся по своим отражательным, спектральным и пространственным свойствам. Объекты поверхности изображаются на снимках в прямой зависимости от этих свойств.

Спектрометрирование проводится для решения нескольких задач, основная из которых — использование оптических характеристик объектов как вспомогательного средства при дешифрировании, но может служить и в качестве самостоятельного метода дистанционного зондирования. При работе с мезозональными или спектральнозональными снимками это помогает определить дешифровочные признаки объектов, выявить возможность распознавания объектов по их спектральным различиям. Знание особенностей спектральной отражательной способности объектов способствует лучшему пониманию дешифровочных признаков [16].

Выявление площадей с различной степенью загрязнения почвенного и снегового покрова тяжелыми металлами по материалам, полученным с различных систем дистанционного зондирования, представляет одну из актуальных задач в связи с усилением антропогенных нагрузок на природную среду, что требует получения оперативной информации для больших территорий. Снеговой покров, обладая свойством интегрального накопления загрязняющих веществ, которые адсорбируются на поверхности кристаллов в процессе их выпадения, используется в качестве планшета-индикатора загрязнения подстилающей поверхности. Аккумулируемые в снеговом покрове ингредиенты сохраняются до снеготаяния и таким образом несут в себе значительную геохимическую информацию.

В районах действия техногенных источников загрязненный снеговой покров позволяет оценить химический состав атмосферных выпадений, их интенсивность, выявить ареалы рассеяния и вместе с данными космической съемки получать информацию о степени загрязнения снегового покрова вблизи промышленных источников. Накопление загрязняющих веществ в снеговом покрове зависит от климатических условий на данный период, свойств подстилающей поверхности, почв, горных пород, рельефа, растительности, локальных техногенных источников. Накопленные в снежной толще загрязняющие вещества в период таяния увеличивают концентра-

ции в весеннем стоке. При таянии они попадают в дождевую канализацию, водоемы и могут быть причиной загрязнения питьевых вод. Известно, что концентрация загрязняющих веществ в атмосфере, поступающих от источников, резко убывает с увеличением расстояния от последних. Аналогичная картина содержания и изменения наблюдается в снеговом покрове.

Ранее дистанционные методы измерения параметров загрязнения местности, особенно в отношении снегового покрова, применялись лишь для определения пространственно-временных характеристик ареала загрязнения. В связи с этим актуализируется проблема сбора и анализа оперативной информации о состоянии снегового покрова на большой территории. Возникла необходимость в разработке дистанционных методов оценки уровней загрязнения снега по цифровым спутниковым изображениям и в построении карт загрязнений [15, 17].

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ СНЕГОВОГО ПОКРОВА ТЕРРИТОРИИ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО РАЙОНА

К настоящему времени спектральная отражательная способность чистого свежевывавшего снега хорошо изучена (рис. 1), что создает важную методическую основу для сопряженного использования методов прямого и дистанционного исследования запыленности снега. Большинство работ отечественных и зарубежных ученых посвящено исследованию процессов снеготаяния и определению снеготаяния по данным спутниковых радиометров MODIS, обладающих высоким спектральным разрешением и большим количеством каналов. Данные радиометра MODIS характеризуются низким пространственным разрешением (250–1000 м), что не позволяет получить достаточно детальные снимки для изучения состояния снегового покрова в интересующих областях. В этом случае бóльший эффект дает применение данных многозональной космической съемки высокого разрешения, наиболее доступными из которых являются снимки со спутников серии Landsat [18–20].

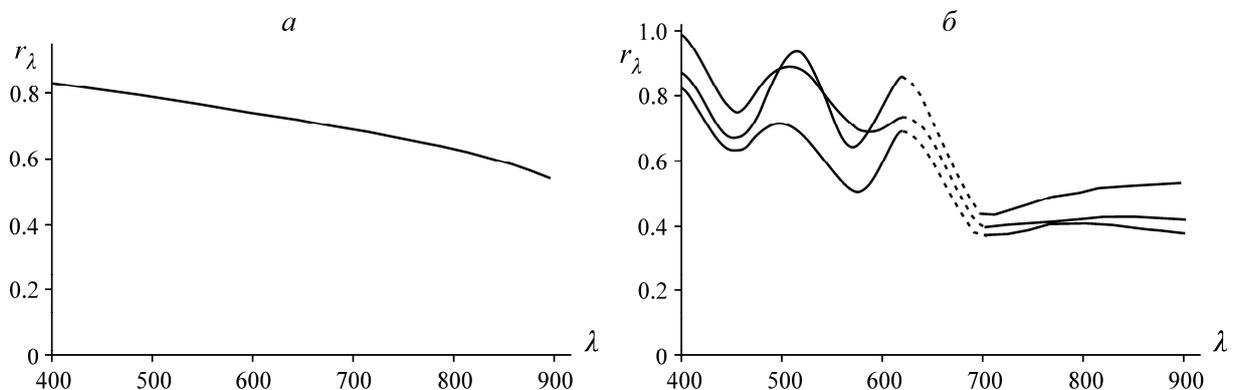


Рис. 1. Атлас спектральных кривых отражения природных образований [21]: *a* — свежевывавший снег; *б* — сухой снег; r_λ — спектральный коэффициент яркости, λ — полосы поглощения

Исследования проводились на территории Бунгурского геолого-промышленного района Кузбасса (Кемеровская область) (рис. 2). В ходе работы был сформирован массив космоснимков за летний и зимний периоды в течение девяти лет (2005–2013 гг.) со спутников среднего и высокого разрешения.

Наибольшую сложность в мониторинге загрязнений окружающей среды в зимний период времени представляет идентификация различий снегового покрова и облаков, поскольку это вода в разных фазовых состояниях. Облака, а также ледовый и снеговой покровы относятся к классу сильно отражающих поверхностей. Отражательная способность чистого снега в види-

мом диапазоне может достигать 90 %. СКЯ облаков сильно варьирует в зависимости от их толщины, но обычно превосходит 30 %. Эти особенности исследуемых объектов наряду с их протяженностью (например, облачность покрывает в среднем около 70 % земной поверхности в каждый данный момент времени) обуславливают важность и актуальность их исследования в ряде научных дисциплин. В первую очередь это относится к задачам метеорологии, климатологии и космического мониторинга земной поверхности и атмосферы.

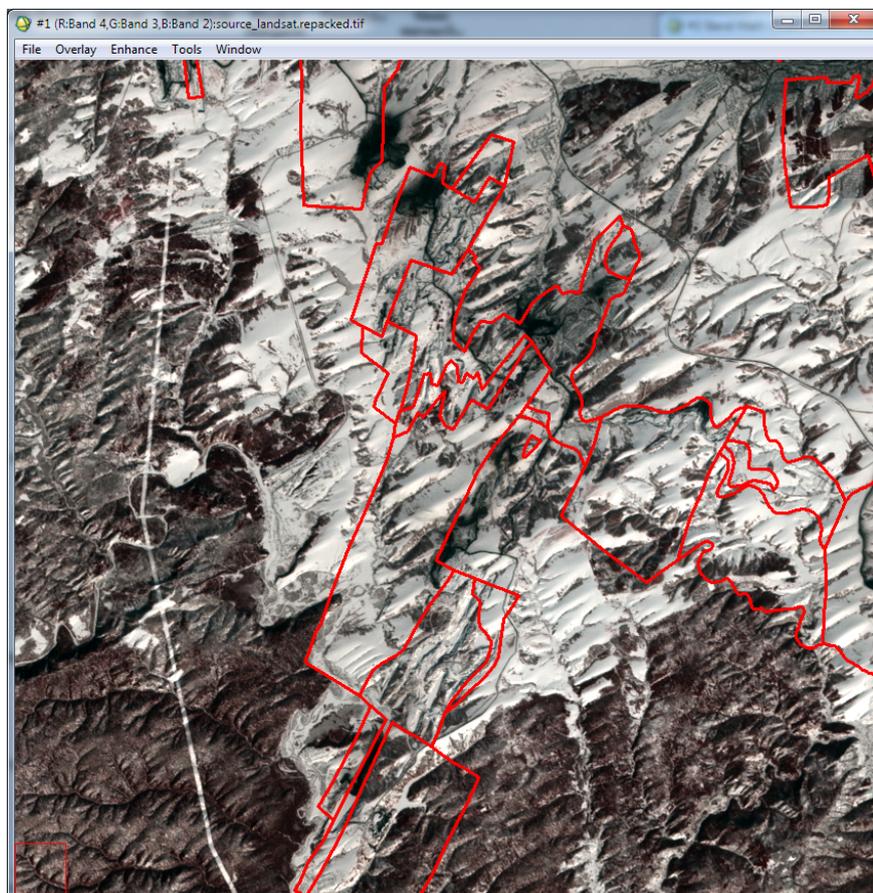


Рис. 2. Бунгурский геолого-промышленный район Кузбасса (Кемеровская обл.), март 2011 г. (красным цветом выделены границы горных отводов)

Для разграничения снегового покрова и облаков рассчитан индекс:

$$\text{NDSCI} = \frac{\rho_{RED} - \rho_{NIR}}{\rho_{RED} + \rho_{NIR}}, \quad (1)$$

где ρ_{RED} — отражение в красной зоне, ρ_{NIR} — в ближней инфракрасной (ИК) зоне (рис. 3).

В силу того что облака и снег имеют аналогичную закономерность распределения яркости по спектру, максимум отражения приходится на синюю зону, а минимум — на ближнюю ИК (отличаются высокой интегральной яркостью). Облачность и снег — самые яркие объекты земной поверхности. Яркость снега стабильна во времени, а у облачности изменчива во времени. Следовательно, суммарная за некоторый отрезок времени яркость облаков меньше, чем снегового покрова. Интегральная яркость облаков и снега понижается при наличии воды в жидком состоянии. Тающий снег и дождевые облака имеют относительно низкую яркость, особенно в ближней ИК части спектра. Яркость снега уменьшается в зависимости от его загрязнения.

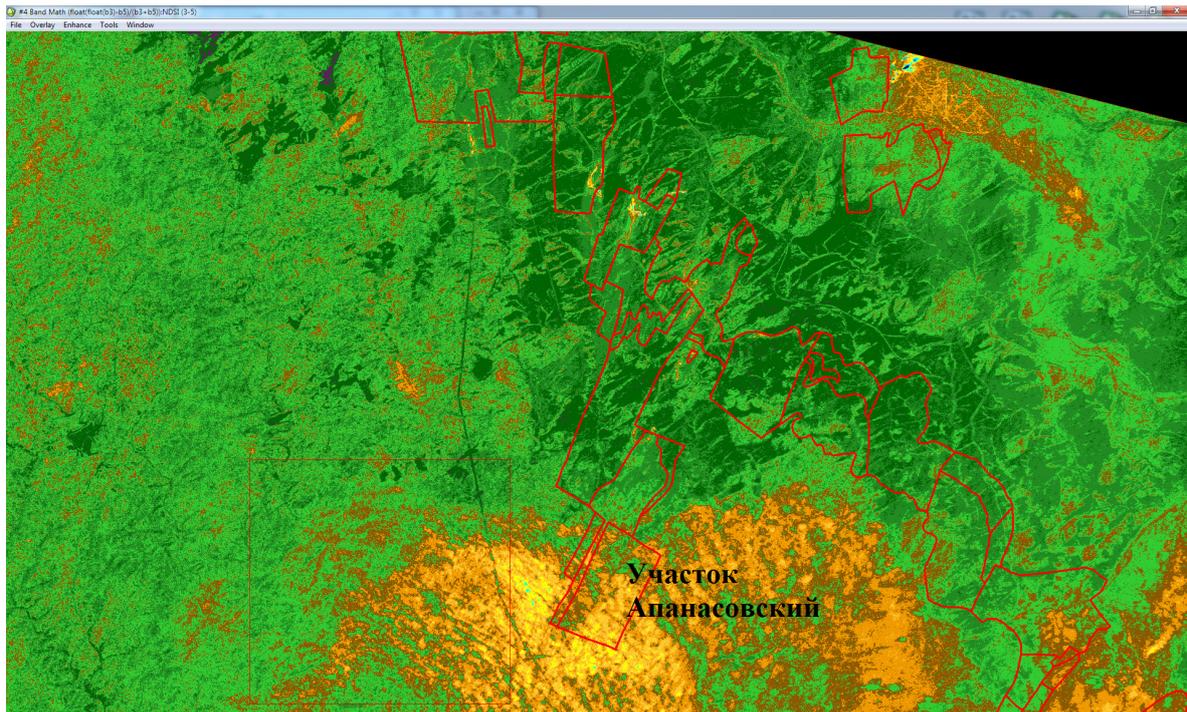


Рис. 3. Карта распределений индекса NDSCI: облака представлены в оттенках желтого цвета (март 2011 г.)

Взаимодействие солнечного излучения и облачного покрова зависит и от облачности. Тонкие перистые облака отражают солнечные лучи видимого участка спектра, но поглощают лучи ближнего инфракрасного спектра. Поэтому они по-разному изображаются на спутниковых снимках. Дым имеет спектральную яркость, аналогичную облакам, максимальная яркость наблюдается в коротковолновой части спектра. Проникающее излучение ближней инфракрасной области частично отражают плотные шлейфы дыма, неплотные — поглощают [22, 23].

Так, например, участок Апанасовский находится в облаках. Это можно наблюдать на рис. 3 — облака закрывают землю, а также на спектральных кривых (рис. 4). В видимых длинах волн (например, 0.66 мкм) снеговой покров так же ярк, как и облака. Это затрудняет возможность отличить его от облачного покрова. Тем не менее на длине волны 1.6 мкм снеговой покров поглощает солнечный свет и, следовательно, проявляется гораздо темнее, чем облака.

Загрязнение снега влияет на яркость изображения на космических снимках, что дает возможность совместно с результатами обработки проб снега картографировать площади и интенсивность загрязнения. Наиболее ощутимы различия в характеристиках снегового покрова загрязненных территорий и на фоновых территориях весной, хотя закладываются они еще зимой. При снеготаянии эти контрасты становятся более выраженными за счет накопления загрязняющих веществ, вытравливаемых из снега [24].

Для выделения ареалов с различными свойствами снегового покрова по космическим снимкам применяются результаты 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, связанном с применением цифровых моделей рельефа для устранения влияния неровностей по-

верхности на освещенность снега, а также для расчета устойчивости снежной массы. Таким образом, существующие методические наработки позволяют выявлять пространственные неоднородности снегового покрова и на качественном уровне оценивать степень запыленности снега для горизонтальных и наклонных поверхностей.

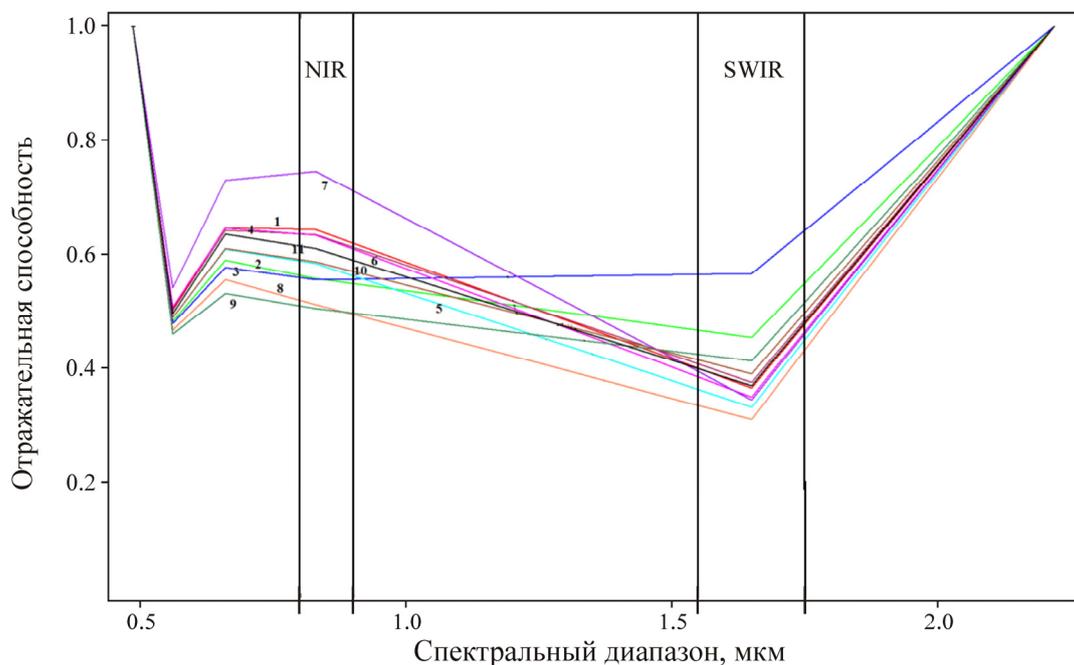


Рис. 4. Спектральные кривые (март 2011 г.): 1 — вблизи с. Костенково; 2 — вниз по реке между с. Костенково и участком Апанасовским; 3 — участок Апанасовский (озеро); 4 — правее от с. Костенково; 5 — правее от участка Апанасовский; 6 — снег в лесу (около р. Чумыш); 7 — снег в лесу (около р. Кара-Чумыш); 8 — разрез Бунгурский; 9 — г. Новокузнецк (шахта им. С. Орджоникидзе) (1); 10 — г. Новокузнецк (шахта им. Г. Димитрова) (2); 11 — снег в поле (Алтайский край, с. Енисейское)

Для выделения территорий, покрытых снегом, рассчитан нормализованный дифференциальный индекс снега NDSI по формуле (2) (рис. 5). NDSI — это относительная величина, характеризующая различие отражательной способности снега в красном (ρ_{RED}) и коротковолновом инфракрасном (ρ_{SWIR}) диапазонах. Для снега $NDSI > 0.4$:

$$NDSI = \frac{\rho_{RED} - \rho_{SWIR}}{\rho_{RED} + \rho_{SWIR}}. \quad (2)$$

Для количественного определения интенсивности осаждения частиц на поверхность снега по данным дистанционного зондирования Земли необходимы сведения о связи уровня запыленности со спектральной отражательной способностью заснеженной поверхности.

В 2012 г. взяты пробы снега в 13 точках (рис. 6), после чего они были проанализированы в лаборатории на состав загрязнения (таблица). Для анализа спектральной отражательной способности снегового покрова построены спектральные кривые как по каждому каналу, так и синтезированные (рис. 7). За эталонную кривую взята кривая снега с гор, находящихся вдали от населенных пунктов.

К основным факторам, влияющим на СКЯ снега, относятся: влажность, загрязненность, размер зерен, плотность снега.

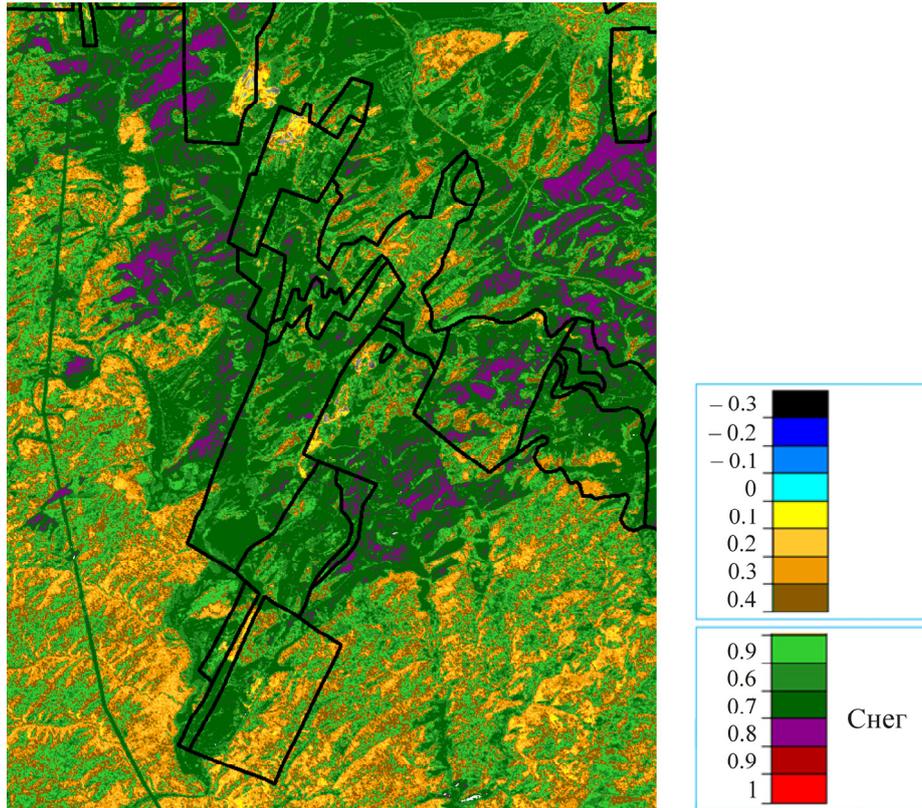


Рис. 5. Выделение территорий, покрытых снегом, по результатам расчета индекса NDSI (февраль 2012 г.)

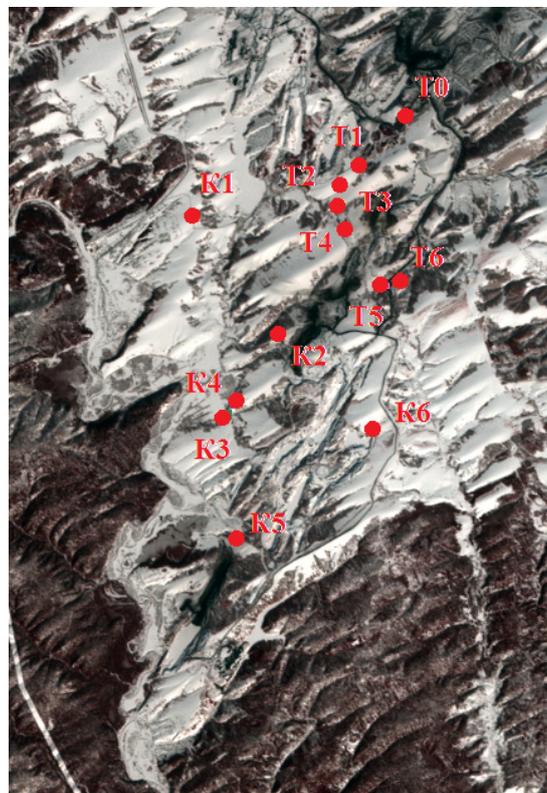


Рис. 6. Коды точек отбора снеговых проб весной 2012 г.

Увеличение влажности снега сопровождается ростом размера зерен и плотности снега. При этом СКЯ снега уменьшается вследствие увеличения поглощения водой и уменьшения роли многократного рассеяния. Загрязненность снега также приводит к снижению СКЯ. Существует зависимость между уменьшением зональных яркостей загрязненного снегового покрова и концентрациями в нем загрязняющих веществ.

Коды и описание точек отбора снеговых проб весной 2012 г.

Номер точки	Код	Описание точки	Координаты	Сухой остаток, г/л	Количество пыли, г/м ²
1	T0	Рядом с лесной рекультивацией слева от дороги Листвяги – Костенково, 1.8 км до подстанции, 30 м от дороги	53.66257 N 86.92977 E	1.017	31.1
2	T1	Рядом с подстанцией, 50 м от дороги в сторону отвалов	53.65097 N 86.91198 E	0.148	7.6
3	T2	500 м на север от отвала	53.64573 N 86.90507 E	0.011	0.5
4	T3	Точка № 4, 300 м на север от отвала	53.64334 N 86.90547 E	0.170	6.6
5	T4	Точка № 5, у северного подножия отвала	53.63839 N 86.90607 E	0.084	8
6	K1	Окраина с. Костенково, 300 м до первых домов	53.63984 N 86.85114 E	0.041	1.9
7	K2	70 м до автомобильного отвала Бунгурского Южного	53.6138 N 86.88242 E	0.089	5.1
8	K3	Болото поймы р. Чумыш за мостом через р. Кандаlep в районе руч. Безымянный	53.59663 N 86.8652 E	0.211	8.3
9	K4	На гряде за мостом через р. Кандаlep в районе руч. Безымянный в 70 м от точки K3	53.59843 N 86.86679 E	0.005	0.2
10	K5	Развилка дорог на окраине с. Ананьино	53.56969 N 86.86845 E	0.232	11.4
11	K6	80 м от дороги на гряде напротив с. Новый Урал	53.59359 N 86.91744 E	1.305	36.1
12	T5	У западного подножия отвала	53.62457 N 86.92171 E	0.637	39
13	T6	200 м на запад от точки T5	53.62511 N 86.9248 E	0.106	5.1

Спектральный ход СКЯ льда аналогичен спектральной зависимости СКЯ снега, однако для льда характерны более низкие значения и более резкое уменьшение СКЯ при увеличении загрязненности. Ввиду высоких показателей поглощения воды в ИК-диапазоне для СКЯ снега характерны очень низкие значения.

Резкое уменьшение СКЯ снега в ИК-диапазоне по сравнению с оптическим позволяет идентифицировать облачность и снег на основе совместного использования снимков в этих диапазонах. Излучательная способность снега в ИК-диапазоне, напротив, приближается к единице и, следовательно, интенсивность его собственного излучения определяется главным образом температурой [18].

По результатам исследования наиболее загрязненными участками являются снеговые пробы Т0, Т5 и Т6. Это подтверждается и численно — по выпадению на подстилающую поверхность количества пылевых частиц (рис. 8). Данные точки находятся наиболее близко к эпицентру загрязнения.

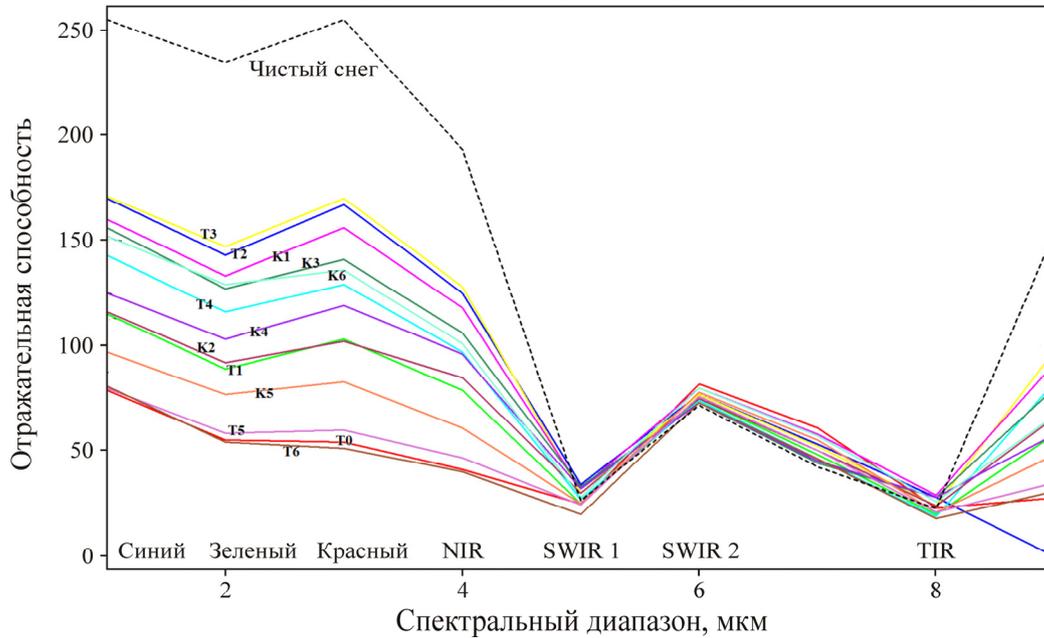


Рис. 7. Спектральные кривые отражающей способности снега (февраль 2012 г.)

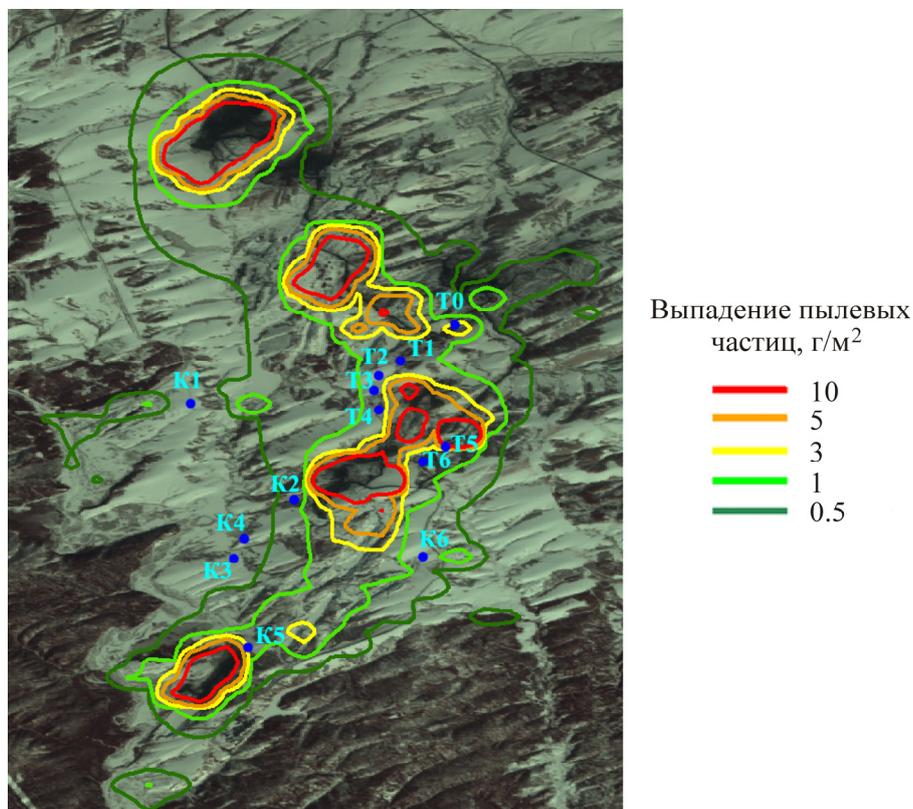


Рис. 8. Изолинии расчетного выпадения суммы пылевых частиц за зимний период 2012 г.

ВЫВОДЫ

В результате выполнения экспериментальных и экспедиционных работ накоплен большой массив эмпирических данных, анализ которых позволяет выявить зависимость уровня загрязнения снегового покрова от конкретных факторов. Разработан новый метод диагностики состояния снегового покрова по данным дистанционного зондирования Земли, который позволяет определять зоны влияния загрязнителей от угледобывающих и перерабатывающих предприятий, что важно для проведения экологических мероприятий по устойчивому развитию горно-промышленных регионов Кузбасса.

Достоверность подхода к определению степени загрязненности снега по мультиспектральным снимкам подтверждена лабораторными исследованиями натуральных проб снега. Полученные закономерности позволяют рекомендовать предложенный подход к анализу экологического воздействия предприятий угледобывающего комплекса в зимний период в качестве метода предварительного мониторинга, целью которого является определение аномальных зон с повышенным содержанием загрязняющих веществ. Это, в свою очередь, позволит снизить субъективизм и неточность в выборе точек забора проб и, следовательно, повысит качество проведения геоэкологического мониторинга в целом.

Экспериментально установлено, что:

— на фоне чистого снега запыленные площадки выглядят более контрастно. Фоновые снега в естественном состоянии всегда ярче искусственно запыленных участков снегового покрова;

— спектральная яркость запыленного снегового покрова неравномерно изменяется в разных участках спектра, более интенсивно она снижается в видимой зоне спектра. С повышением дозы запылителя эти различия возрастают. При дозе более 500 г/м^2 коэффициенты яркости в ближней инфракрасной зоне в 1.5–3.0 раза выше, чем в видимой.

Сопоставленные данные обработки мультиспектральных снимков, результатов расчетов и лабораторных замеров позволяют сделать вывод о том, что использование данных дистанционного зондирования Земли надежно идентифицирует поверхность с пылевыми и аэрозольными загрязнителями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / Опарин В. Н. и др. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
2. Потапов В. П. Математическое и информационное моделирование геосистем угольных предприятий. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
3. Опарин В. Н., Потапов В. П., Попов С. Е., Замараев Р. Ю., Харлампенков И. Е. Разработка распределенных ГИС-средств мониторинга миграций сейсмических проявлений // ФТПРПИ. — 2010. — № 6.
4. Калабин Г. В. Методология количественной оценки окружающей среды на территориях размещения предприятий по освоению георесурсов // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
5. 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.
6. Потапов В. П., Опарин В. Н., Логов А. Б., Замараев Р. Ю., Попов С. Е. Геоинформационная система регионального контроля геомеханико-геодинамических ситуаций на основе энтропийного анализа сейсмических событий (на примере Кузбасса) // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
7. Бычков И. В., Опарин В. Н., Потапов В. П. Облачные технологии в решении задач горной геоинформатики // ФТПРПИ. — 2014. — № 1.

8. **Калабин Г. В., Горный В. И., Крицук С. Г.** Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятий по освоению Сорского медно-молибденового месторождения // ФТПРПИ. — 2014. — № 1.
9. **Ковалев В. А., Потапов В. П., Счастливец Е. Л.** Мониторинг состояния природной среды угледобывающих районов Кузбасса. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
10. **СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03** с изменением № 1 СанПиН 2.2.1/2.2.1-2362-08 от 10 апреля 2008 г., № 25 // Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. — М., 2008.
11. **ОНД-86.** Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. — Л.: Гидрометеиздат, 1987.
12. **Методика** расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (дополнение к ОНД-86). — СПб.: ГГО им. А. И. Воейкова, 2005.
13. **Кравцова В. И., Маслов А. А., Тутубалина О. В.** Изображения Земли из космоса: примеры применения. — М.: ООО Инж.-технол. центр “Сканэкс”, 2005.
14. **Михайлов С. И.** Методика детектирования случаев загрязнения природной среды на суше по данным спутниковых наблюдений // Проблемы анализа риска. — 2009. — Т. 6. — № 1.
15. **Толмачева Н. И., Шкляева Л. С.** Космические методы экологического мониторинга: учеб. пособие. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2012.
16. **Толмачева Н. И.** Космические методы исследований в метеорологии. Интерпретация спутниковых изображений. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2012.
17. **Прокачева В. Г., Усачев В. Ф.** От космических снимков к эколого-гидрографической статистике // ГИС для устойчивого развития территорий. Ч. 3. ГИС и картография в экологии и охране природы. — Якутск: Изд-во ЯГУ, 1999.
18. **Чепелев О. А., Ломиворотова О. М., Украинский П. А., Терехин Э. А.** Изучение связи запыленности снега с его спектральной отражательной способностью // Изв. Самар. науч. центра РАН. — 2010. — Т. 12. — № 1(4).
19. **Богомолов Л. А.** Дешифрирование аэрокосмоснимков. — М.: Недра, 1976.
20. **Landgrebe D. A.** Signal theory methods in multispectral remote sensing. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
21. **Кринов Е.Л.** Спектральная отражательная способность природных образований. — М.: Изд-во АН СССР, 1947.
22. **Clark R. N., Roush T. L.** Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications, *Journal of Geophysical Research*, 1984, Vol. 89, No. B7.
23. **De Jong S. M., van der Meer F. D.** Remote Sensing Image Analysis Including The Spatial Domain. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2004.
24. **Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., Тикунов В. С. и др.** Геоинформатика / под ред. В. С. Тикунова — М.: Академия, 2005.

Поступила в редакцию 24/IV 2014