

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 502.1:502.568:504.1:528.854:528.88

К. В. МЯЧИНА, А. А. ЧИБИЛЁВ

Институт степи УрО РАН, г. Оренбург

ВЫЯВЛЕНИЕ НАРУШЕННЫХ НЕФТЕДОБЫЧЕЙ СТЕПНЫХ ЗЕМЕЛЬ ОРЕНБУРГСКОГО ЗАВОЛЖЬЯ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Сделана попытка выявления нарушенных в процессе нефтедобычи земель на основе спутниковых данных среднего пространственного разрешения (*Landsat*), полученных в период вегетации. Ключевой участок изучения включает объекты трех нефтяных месторождений, размещенных в пределах различных типов степных ландшафтов Оренбургского Заволжья. Создана карта территориальных единиц (*Land Cover*), дающая представление о пространственной организации изучаемой зоны. Показано, что отличительной особенностью территорий, находящихся в процессе интенсивного недропользования, является угнетенный или отсутствующий растительный покров. Подобран ряд спектральных преобразований, призванных дешифровать обнаженные участки земной поверхности. Использованы преобразования *Tasseled Cap* и *SMACC*, а также спектральные индексы *IrOx*, *GSI*, *PDI*, *NBI*. Сопоставлены результаты их применения для распознавания класса нарушенных земель. Выявление значимого диапазона спектральных индексов и верификация результатов выполнены по данным контрольного векторного слоя объектов, созданного в ходе полевых исследований и дополненного оцифровкой спутниковых изображений высокого разрешения. Обнаружено, что основная трудность в дешифрировании поврежденных площадей заключается в высоких показателях сельскохозяйственной освоенности территории. Установлено, что преобразование *SMACC* позволяет с наибольшей точностью выделить нарушенные нефтепромыслами земли.

Ключевые слова: степная зона, нефтепромыслы, нарушения, распознавание, *Landsat*, спектральные преобразования.

An attempt is made to identify lands disturbed in the process of oil development and production, based on moderate spatial resolution Landsat images obtained at the growing period. The key study area includes the facilities of three oil fields within the boundaries of steppe landscapes of different types in the Orenburg Trans-Volga Region. The map of territorial units (Land Cover) was generated to give insight into the spatial organization of the zone under study. It is shown that a distinguishing feature of the territories in the process of intensive use of mineral resources is the oppressed vegetation cover or the absence thereof. We selected a number of spectral transformations to be used in interpreting the bare tracts of land surface. Use was made of the Tasseled Cap and SMACC transformations as well as the IrOx, GSI, PDI and NBI spectral indices. Results from using them were compared in order to identify the disturbed lands. Identification of the meaningful range of spectral indices and verification of results were carried out on the basis of data on the control vector layer of objects generated as part of field investigations and complemented by digitizing high resolution satellite images. It is found that the central problem with interpretation of the disturbed areas involves high indicators of agricultural development of the territory. It is established that the SMACC transformation provides the highest accuracy of identification of the lands disturbed by oil extraction operations.

Keywords: *steppe zone, oil fields, land disturbance, image interpretation, Landsat, spectral transformations.*

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Районы с развитой структурой нефтедобывающего производства характеризуются, как правило, негативными последствиями недропользования. На территориях нефтепромыслов естественные территории преобразованы в природно-техногенные, в которых обнаруживаются глубокие, часто необратимые изменения, сопровождаемые в первую очередь обширными нарушениями почвенно-растительного покрова. В то же время нефть представляет собой важнейший стратегический ресурс, поэтому ее добыча необходима и правомерна. Следовательно, при осуществлении нефтегазового недропользования на первое место должен ставиться принцип соблюдения баланса между потребностями общества и естественной ландшафтной среды, что подразумевает необходимый уровень геоэкологического мониторинга.

га. Однако используя исключительно наземные методы исследования, сложно держать под надлежащим контролем обширные площади в районах функционирования нефтедобывающего производства. В связи с этим многими российскими и зарубежными исследователями проводятся работы по изучению геоэкологического состояния территорий нефтегазодобычи на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Известны публикации иностранных специалистов, касающиеся трансформаций компонентов природной среды непосредственно в районах нефтегазодобычи [1–3]. В среде российских исследователей на основе спутниковых данных изучается воздействие нефтегазопромысловых объектов на растительный покров [4–6], осуществляется геодинамический мониторинг месторождений Западной Сибири [7], проводятся комплексные исследования районов нефтегазодобычи [4, 8–11].

Данная работа является продолжением исследований авторов на тему анализа ландшафтов нефтепромыслов Оренбургской части степной зоны Заволжья, выполняемых с помощью традиционных геоэкологических методов, а также методов интерпретации данных ДЗЗ [12–15]. В географическом отношении Оренбургское Заволжье представляет собой юго-восточную окраину Восточно-Европейской равнины, отделенную от Уральской горной страны Предуральским краевым прогибом, и является одним из основных регионов нефтегазодобычи в России, входящих в состав Волго-Уральской нефтегазоносной провинции [15]. Актуальность выполняемых работ обусловлена тем, что степная зона — один из базовых биомов суши, представляющий практические на всех континентах. При этом степные ландшафты можно назвать наиболее освоенными в хозяйственном отношении и характеризующимися обострением экологических проблем. Недропользование, в частности добыча нефти и газа, — один из главных агентов влияния на ландшафты степных территорий, этот вид природопользования осуществляется более чем в ста странах мира.

Среди наиболее сложных задач при геоэкологическом анализе природно-техногенных комплексов нефтепромыслов можно отметить выявление истинного количества земель, измененных и нарушенных в процессе внедрения объектов инфраструктуры. В предлагаемой работе сделана попытка решить указанную задачу, анализируя данные дистанционного зондирования Земли на основе ряда спектральных преобразований. Их различные алгоритмы нередко используются в практике интерпретации спутниковых изображений для анализа динамики природных и природно-техногенных комплексов, в том числе в аридных зонах [16–24]. Преимущество метода спектральных преобразований перед другими видами классификации (классификация без обучения, классификация с обучением, экспертное дешифрирование) состоит в том, что полученный и проверенный диапазон значений спектрального индекса может применяться для снимка этой же территории, но другого периода времени, а также для снимков сходных территорий. Исследователь будет избавлен от затрат времени на интерпретацию снимка, которую в противном случае он вынужден проводить для каждой новой сцены практически с самого начала. Этот фактор — снижение трудозатрат на дешифрирование с сохранением высокой точности обработки информации — делает указанный метод привлекательным и перспективным [12].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве ключевой территории выбран степной участок площадью около 170 км², включающий объекты трех нефтяных месторождений: Кодяковского, Смоляного и Боголюбовского. Выбор участка исследования обусловлен следующими факторами: разработка недр на территории ведется с 1994 г., что свидетельствует о значительных объемах накопленной техногенной нагрузки, способствующей существенной трансформации природных комплексов; объекты недропользования размещены в пределах различных типов степных ландшафтов (холмисто-увалистые равнины, плакоры, участки поймы); основная часть объектов, как и по всей нефтегазоносной части области, находится в границах земель сельскохозяйственного назначения.

На территории исследования располагаются более 90 площадок с объектами нефтедобывающей инфраструктуры, в том числе со скважинами различного назначения и узловыми сооружениями. Как правило, при формировании площадки для размещения оборудования естественный почвенно-растительный покров полностью уничтожается, производится отсыпка местным или привозным грунтом (рис. 1).

Угнетенный или отсутствующий растительный покров — отличительная особенность территорий, находящихся в процессе интенсивного недропользования, которая позволяет из многочисленных вариантов спектральных индексов выбрать те, которые помогают дешифрировать обнаженные участки земной поверхности. Как известно, почва представляет собой сложную смесь минеральных и органических

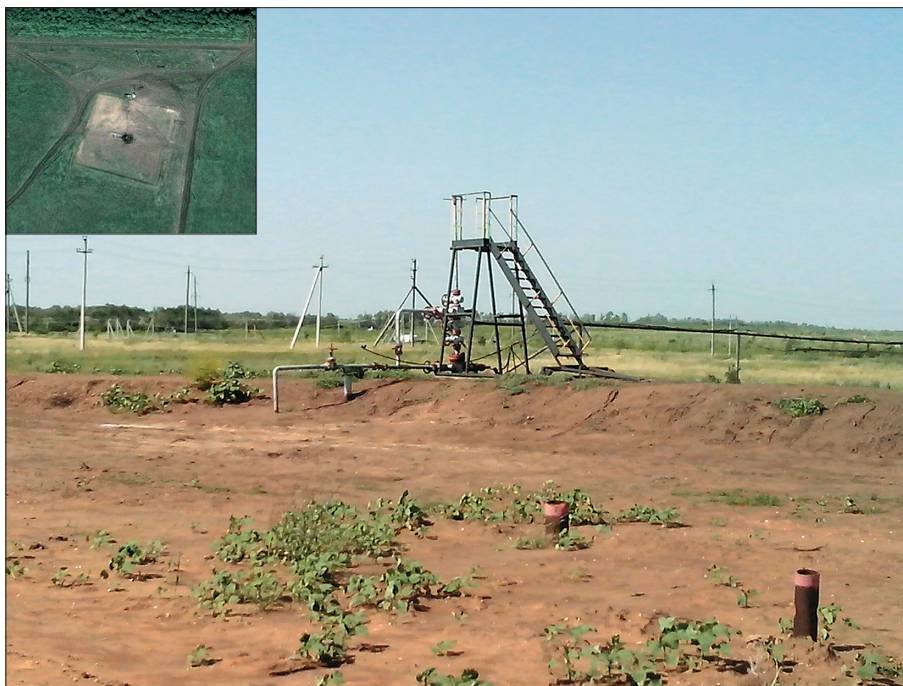


Рис. 1. Техническая площадка на территории Кодяковского месторождения нефти, июнь 2014 г.

На врезке — спутниковое изображение участка.

веществ, обладающих различными физическими и химическими свойствами, влияющими на ее поглощательную и отражательную способность. Содержание влаги, органического вещества и минеральных компонентов, размер преобладающих в почвенном покрове частиц (глина, песок, пыль и пр.), характеристики шероховатости поверхности — факторы, оказывающие значительное влияние на спектральную отражательную способность почвы и способствующие разработке многочисленных спектральных индексов, нацеленных на выявление открытых участков или участков со значительно угнетенным растительным покровом. Обнаженные почвы могут включать как площади с эродированным почвенно-растительным покровом (например, в результате выпаса скота), так и измененные в ходе антропогенного воздействия (дороги, производственные площадки и т. п.).

Следует пояснить, что в некоторой степени индикаторами оголенности ландшафтного покрова могут служить вегетационные индексы (NDVI, SAVI, EVI и т. д.), определенные значения которых соответствуют открытым участкам поверхности и водоемам. Однако основная трудность в нашем случае заключается в том, что исследуемая территория весьма сложна для автоматического дешифрирования, так как степные регионы, как правило, распаханы на 70–90 %, и Оренбургская область — не исключение: здесь более 70 % территории составляют пашни, вносящие путаницу в результаты дешифрирования. В условиях активного сельскохозяйственного использования земель эффективность вегетационных индексов для распознавания обнаженных поверхностей значительно снижается ввиду особенностей технологий севооборота, подразумевающих наличие открытых пашен в весенний и осенний периоды, когда естественная растительность еще находится в стадии вегетации [12]. Попытка применения маски сельскохозяйственных угодий для отделения участков инфраструктуры нефтепромыслов и облегчения дальнейшей обработки изображений не привела к желаемому результату в связи с большим количеством объектов месторождений, смешанных с сельскохозяйственными угодьями, а также с разными стадиями обработки распаханых площадей в зависимости от года и сезона.

Таким образом, задачей исследования являлся поиск спектральных преобразований, позволяющих наиболее точно выделять участки деградированного почвенно-растительного покрова. Для этих целей был испытан ряд спектральных преобразований, эффективность применения которых показана в таблице.

Анализ и расчет индексов были произведены для сцены спутника Landsat 8-OLI от 15 июня 2013 г., включающей исследуемую территорию; дешифрирование и обработка осуществлялись в специализиро-

Спектральные преобразования, анализируемые в ходе работы

Индекс	Краткое описание
IgOx	Основан на отношении синего и красного каналов изображения и призван характеризовать участки земной поверхности по уровню содержания оксида железа [25]. Соответственно есть основания ожидать, что значения индекса для нарушенных обнаженных участков будут отличаться от показателей для естественных ландшафтов
GSI	Основан на различиях в размере почвенных частиц, влияющих на отражательные свойства почвы; при вычислении используются синий, зеленый и красный каналы изображения [26]. Применяется в исследованиях, связанных с проблемами опустынивания и деградации земель [27]. Отсыпка площадок под объекты инфраструктуры нефтепромыслов привозным грунтом или песчано-гравийной смесью может способствовать получению корректного результата при применении этого индекса
PDI	Перпендикулярный индекс засухи, метод вычисления основан на особенностях распределения почвенной влаги, при подсчете используются средний и ближний инфракрасный каналы, а также угол наклона почвенной линии [28]. Применение основано на предположении, что стрессовые условия для почвенно-растительного покрова характеризуются пониженной влажностью
NBI	Нормализованный индекс гарей, при вычислении используются средний и ближний инфракрасный каналы [21, 29]. Применяется для выявления территорий со значительными повреждениями растительного покрова
SMACC (Sequential Maximum Angle Convex Cone)	Представляет собой инструмент ПО ENVI для поиска и отображения конечных целей, выделяемых на основе итерационного алгоритма. Конечными целями обозначаются спектры, каждый пиксел которых содержит только один материал, описываемый охватывающим его подмножеством спектров, или высокий процент одного материала. Более точный результат получен при выполнении преобразования SMACC без сведения схожих конечных целей
TC (Tasseled Cap)	Спектральные преобразования ТС, являющиеся частным случаем анализа главных компонент, основаны на расчете некоррелированных составляющих снимка, позволяющих более детально анализировать его спектральный отклик. Оценивались результаты анализа по трем главным компонентам преобразования ТС: основной компоненты «Яркость» и двух перпендикулярных компонент «Зеленость» и «Влажность». Для изображения Landsat 8-OLI расчет ТС производился непосредственно по формулам, так как ПО ENVI не содержит встроенного алгоритма расчета ТС для снимков указанного спутника

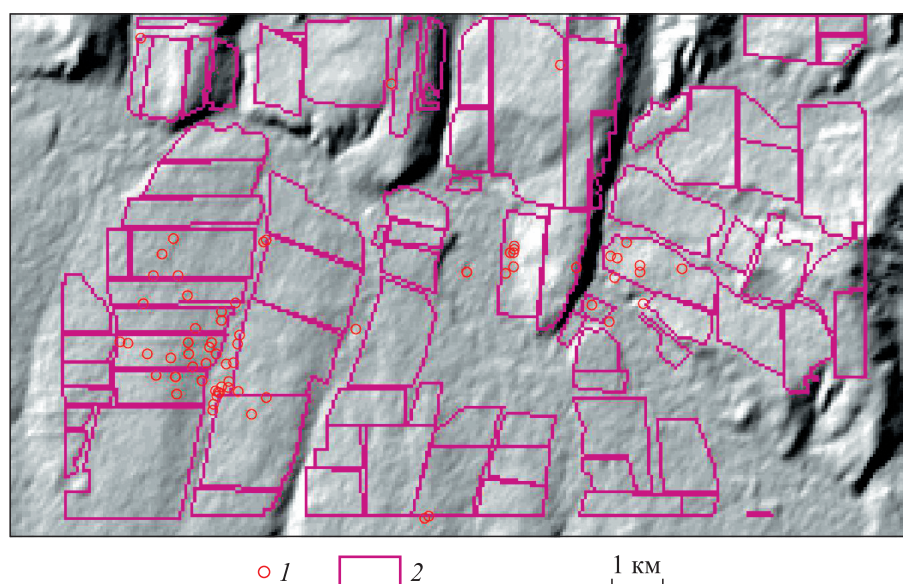


Рис. 2. Размещение сельскохозяйственных угодий и объектов нефтепромыслов относительно особенностей рельефа территории исследования.

1 — площадки размещения объектов нефтепромыслов; 2 — границы сельскохозяйственных угодий.

ванном ПО ENVI 5.1 и среде ArcGIS 10.2. Предварительная подготовка изображения заключалась в выполнении радиометрической калибровки и атмосферной коррекции. Далее, используя вегетационные индексы NDVI и SAVI, была создана карта ландшафтного покрова территории исследования (в понятии «Land Cover», широко используемом в мировой науке и обозначающем в этой интерпретации сочетание состояний элементарных территориальных единиц), на которую нанесен слой площадок с объектами инфраструктуры месторождений, сформированный на основе GPS-фиксации координат в ходе полевых исследований и дополненный данными ручной оцифровки материалов Google Earth. Далее выполнена ручная оцифровка границ сельскохозяйственных угодий, слой которых затем наложен на цифровую модель рельефа для наглядного отображения рельефа ключевой территории и визуализации особенностей размещения объектов в границах агроландшафтов (рис. 2). Следующим шагом стало осуществление спектральных преобразований изображения Landsat 8-OLI с пространственным разрешением 30 м (см. таблицу).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты применения спектральных преобразований анализировались по двум критериям. Во-первых, учитывалось количество площадок объектов нефтепромыслов с контрольного слоя, охваченных значимым диапазоном спектрального индекса. Во-вторых, оценивалось превышение ширины значимого класса индексного изображения за счет включения посторонних объектов.

Наименее достоверный результат получается в случае преобразования Tasseled Cap. Высокая степень охвата объектов нефтепромыслов, особенно для компоненты Brightness (90 объектов из 93-х контрольного слоя), достигается за счет существенного «расползания» площади значимого класса по посторонним объектам. Также малоинформативно использование индексов PDI и GSI. Низкая степень охвата объектов и высокий процент «расползания» указывают на бесперспективность указанных спектральных индексов для целей исследования.

Индексы NBI и IgOx показывают довольно высокий результат выявления объектов (88 и 96 % соответственно). Однако наличие значительных площадей распаханых территорий, не покрытых или слабо покрытых всходами, является причиной значительной погрешности, выражающейся в смешении объектов нефтепромыслов и обнаженных пашен. Данный результат в очередной раз подтверждает, что основная трудность в регистрации нарушенных участков для региона исследования заключается в высоких показателях распаханности территории.

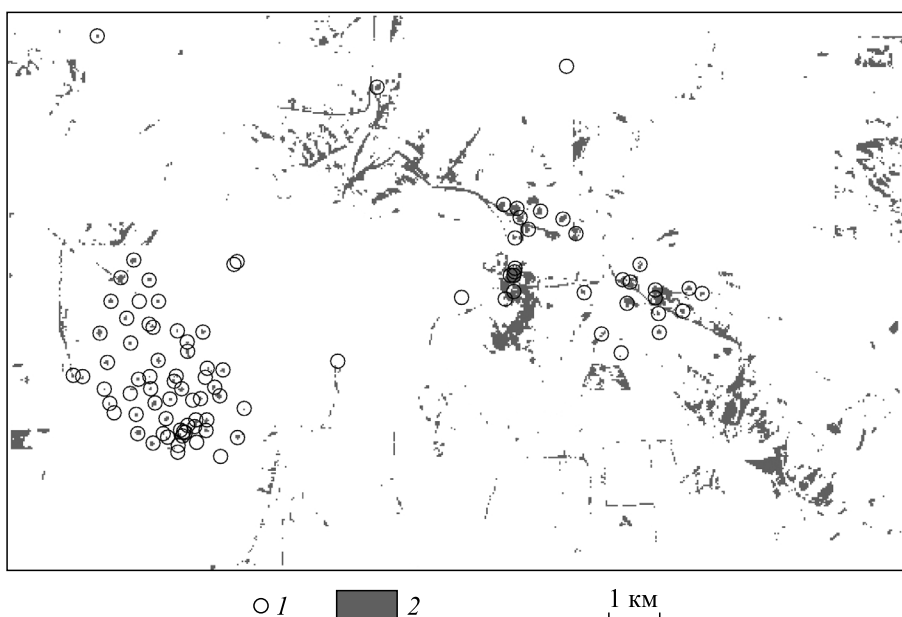


Рис. 3. Отображение значимых диапазонов преобразования SMACC.

1 — площадки размещения объектов нефтепромыслов; 2 — распределение значимого диапазона результатов преобразования SMACC.

Наиболее достоверно выделить нарушенные участки на территории нефтепромысла позволяет инструмент SMACC (рис. 3). Точность охвата объектов составляет 72 %, при этом степень «расползания» по соседним объектам значительно ниже, чем при использовании других видов спектральных преобразований. Исходя из результатов предыдущих исследований авторов на подобную тему [12, 13], а также учитывая проблему смешивания значений условных классов «участок объекта нефтепромысла» и «пашня», можно сделать вывод, что полученный результат достаточно корректен. Кроме того, при оценке точности результата следует учитывать, что существенная часть объектов имеет небольшие размеры, сопоставимые с размером пиксела (30 × 40 м), и характеризуется разнородным грунтом для отсыпки площадок. Поэтому даже их визуальное распознавание на спутниковых снимках пространственного разрешения 30 м не является абсолютно достоверным. Исходя из этих соображений, полученный результат можно считать удовлетворительным для поставленной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие большого количества сельскохозяйственных угодий, в частности полей в степной зоне, которые подвергаются разнообразной сезонной обработке (распашка, боронение, парование, химическая обработка сорняков), приводит к тому, что доля обнаженных почв значительно возрастает и вносит ощутимую путаницу в распознавание объектов антропогенной инфраструктуры. При использовании сходных методов обработки спутниковой информации в условиях, например, тундры, растительный покров которой отличается равномерностью, стабильностью и высокой степенью уязвимости (медленное возобновление после повреждения), достигнута весьма высокая степень точности дешифрирования промышленных объектов [4]. С учетом вышеописанных особенностей степной зоны можно сделать следующий вывод: если с целью повышения точности распознавания нарушенных нефтяной инфраструктурой земель представляется целесообразным вывести из расчетов площади, занятые агроландшафтами, не потеряв при этом значительную часть техногенных объектов, то достаточно эффективным будет применение индексов NBI и IgOx; если же в работе нежелательно использовать маску сельскохозяйственных угодий, то наиболее достоверный результат покажет преобразование SMACC. На основе этого инструмента планируется провести анализ многолетней серии спутниковых изображений территории исследования, с тем чтобы выявить динамику деградации почвенно-растительного покрова в районе функционирования нефтепромыслов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (14–05–31467– мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang Y., Guindon B., Lantz N., Shipman T., Chao D., Raymond D. Quantification of anthropogenic and natural changes in oil sands mining infrastructure land based on RapidEye and SPOT5 // Intern. Journ. of Applied Earth Observation and Geoinformation. — 2014. — N 29. — P. 31–43.
2. Kumpula T., Pajunen A., Kaarlejärvi E., Forbes B. C., Stammer F. Land use and land cover change in Arctic Russia: Ecological and social implications of industrial development // Global Environmental Change. — 2011. — N 21. — P. 550–562.
3. Baynard C. W. The landscape infrastructure footprint of oil development: Venezuela's heavy oil belt // Ecological Indicators. — 2011. — N 11 (3). — P. 789–810.
4. Елсаков В. В. Спутниковая съемка в экологическом мониторинге регионов добычи углеводородов // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т. 9, № 5. — С. 133–139.
5. Корниенко С. Г. Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съемки // География и природ. ресурсы. — 2011. — № 1. — С. 67–73.
6. Полищук Ю. М., Токарева О. С. Картографирование экологических рисков воздействия нефтедобычи на растительный покров с использованием спутниковых данных // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2010. — Т. 7, № 3. — С. 269–274.
7. Филатов А. В., Евтюшкин А. В., Васильев Ю. В. Многолетний геодинамический мониторинг нефтегазовых месторождений Западной Сибири методом спутниковой радиолокационной интерферометрии // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т. 9, № 2. — С. 39–47.
8. Абрисимов А. В., Беленов А. В., Брагин Е. А. Космический контроль недропользования и природопользования // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. — 2011. — № 12. — С. 38–42.

9. Walker T. R., Crittenden P. D., Dauvalter V. A., Jones V., Kuhry P., Loskutova O., Mikkola K., Nikula A., Patova A., Ponomarev V. I., Pystina T., Rätti O., Solovieva N., Stenina A., Virtanen T., Young S. D. Multiple indicators of human impacts on the environment in the Pechora Basin, north-eastern European Russia // *Ecological Indicators*. — 2009. — N 9 (4). — P. 765–779.
10. Mikhaylov S., Targulyan O. Landscape impact assessment of the oil and gas industry in the Russia using space images interpretation // *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil*. — Natal: IMPE, 2009. — P. 6711–6717.
11. Брыксин В. М., Евтюшкин А. В., Еремеев А. В., Свидрицкая М. А., Хамедов В. А. Оперативный мониторинг пожарной обстановки в технологических коридорах магистральных трубопроводов // *Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса*. — 2008. — Т. 5, № 2. — С. 438–442.
12. Мячина К. В., Малахов Д. В. Опыт применения данных дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения для выделения объектов нефтепромыслов в условиях техногенно-модифицированного ландшафта (на примере Оренбургской области) // *Изв. Самар. науч. центра РАН*. — 2013. — Т. 15, № 3 (7). — С. 2341–2345.
13. Мячина К. В., Токарева О. С. Геоэкологический анализ степных ландшафтов в районах нефтегазодобычи (на примере Оренбургской области) // *Изв. Том. политехн. ун-та*. — 2014. — Т. 324, № 1. — С. 196–202.
14. Mjachina K. V., Baynard C. W., Chibilyev A. A. Oil and gas development in the Orenburg region of the Volga–Ural steppe zone: qualifying and quantifying disturbance regimes // *Intern. Journ. of Sustainable Development and World Ecology*. — 2014. — Vol. 21, N 2. — P. 111–126.
15. Чибилёв А. А., Мячина К. В. Геоэкологические последствия нефтегазодобычи в Оренбургской области. — Екатеринбург: Изд-во Урал. отд-ния РАН, 2007. — 132 с.
16. Reeves M. C., Baggett L. S. A remote sensing protocol for identifying rangelands with degraded productive capacity // *Ecological Indicators*. — 2014. — Vol. 43, N 3. — P. 172–182.
17. Huang C., Chen Y., Wu J. Mapping spatio-temporal flood inundation dynamics at large riverbasin scale using time-series flow data and MODIS imagery // *Intern. Journ. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. — 2014. — N 26. — P. 350–362.
18. Gaitána J., Brana D., Olivab G., Georgina C., Nakamatsuc V., Salomoned J., Ferranteb D., Buonod G., Massarad V., Humanob G., Celdránd D., Opazoc W., Maestre F. T. Evaluating the performance of multiple remote sensing indices to predict the spatial variability of ecosystem structure and functioning in Patagonian steppes // *Ecological Indicators*. — 2013. — N 34. — P. 181–191.
19. Hill J. M. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated SENTINEL 2 data for a North American transect // *Remote Sensing of Environment*. — 2013. — N 137. — P. 94–111.
20. Stroppiana D., Bordogna G., Carrara P., Boschetti M., Boschetti L., Brivio P. A. A method for extracting burned areas from Landsat TM/ETM+ images by soft aggregation of multiple Spectral Indices and a region growing algorithm // *ISPRS Journ. of Photogrammetry and Remote Sensing*. — 2012. — N 69. — P. 88–102.
21. Veraverbeke S., Lhermitteb S., Verstraetenc W., Goossens R. The temporal dimension of differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) fire/burn severity studies: The case of the large 2007 Peloponnese wildfires in Greece // *Remote Sensing of Environment*. — 2010. — Vol. 114, N 11. — P. 2548–2563.
22. Fadhil A. M. Land Degradation Detection Using Geo-Information Technology for Some Sites in Iraq // *Journ. of Al-Nahrain Univ. Sci.* — 2009. — Vol. 12, N 3. — P. 94–108.
23. Терехин Э. А. Методика поиска эффективных спектральных индексов для автоматизированного дешифрирования водных объектов (на примере Белгородской области) // *География и природ. ресурсы*. — 2013. — № 3. — С. 132–138.
24. Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б. Спутниковый индекс климатических экстремумов засушливых земель // *Аридные экосистемы*. — 2012. — Т. 18, № 4 (53). — С. 5–12.
25. Soe M., Kyaw T. A., Takashima I. Application of Remote Sensing Techniques on Iron Oxide Detection from ASTER and Landsat Images of Tanintharyi Coastal Area, Myanmar // *Scientific and Technical Reports of Faculty of Engineering and Resource Science, Akita Univ.* — 2005. — N 26. — P. 21–28.
26. Xiao J., Shen Y., Tateishi R., Bayaer W. Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing // *Intern. Journ. of Remote Sensing*. — 2006. — Vol. 27, N 12. — P. 2411–2422.
27. Marchetti A., Piccini C., Francaviglia R., Santucci S., Chiuchiarelli I. Estimating Soil Organic Matter Content by Regression Kriging // *Digital Soil Mapping. Progress in Soil Science*. — 2010. — Vol. 20, N 2. — P. 241–254.
28. Ghulama A., Qina Q., Teyip T., Lid Z. Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method // *ISPRS Journ. of Photogrammetry and Remote Sensing*. — 2007. — Vol. 62, N 2. — P. 150–164.
29. Röder A., Hill J., Duguay B., Alloza J. A., Vallejo R. Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in the Ayora region (eastern Spain) // *Remote Sensing of Environment*. — 2008. — N 112. — P. 259–273.

Поступила в редакцию 11 ноября 2014 г.