

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

УДК 622.852:528.88.042.4

ПРОГНОЗ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА СОСТОЯНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

С. П. Месяц, С. П. Остапенко

*Горный институт КНЦ РАН, E-mail: mesyats@goi.kolasc.net.ru,
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Изучено воздействие горнопромышленных предприятий на природную среду по двум критериям: аэрозольному техногенному загрязнению и состоянию растительного покрова по данным многолетних спутниковых наблюдений территории. На примере предприятий Кольского горнопромышленного комплекса выполнен прогноз техногенного воздействия по перекрытию областей аэрозольного загрязнения и уменьшения вегетационного индекса. Показано хорошее совпадение полученных прогнозных оценок границ импактных зон предприятий в случаях одного или двух источников воздействия и его отсутствие для множественных источников. Предложенный подход к интеграции данных дистанционных наблюдений позволяет дифференцировать техногенное воздействие на природную среду и естественные изменения растительного покрова.

Горнопромышленное предприятие, аэрозольное техногенное воздействие, растительный покров, спутниковое наблюдение, вегетационный индекс, геоинформационная система, прогнозирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20180420

Техногенное воздействие на природную среду при добыче, перемещении, переработке горных пород горнопромышленными предприятиями многообразно, значительно и распространяется на десятки километров [1]. Адекватным способом оценки масштабного техногенного воздействия является спутниковое наблюдение земной поверхности и приземных слоев атмосферы, которое проводят в широком диапазоне отраженного электромагнитного излучения, в том числе с использованием расположенных на спутниках мульти- и гиперспектральных систем [2, 3]. С целью повышения достоверности данные дистанционных наблюдений, полученные из разных источников, объединяют в геоинформационных системах [4, 5], что обеспечивает возможность многофакторной оценки, анализа и прогноза на их основе.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ и Правительства Мурманской области (№ 17-45-510037).

Перспективный метод интегральной оценки многофакторного техногенного воздействия — биоиндикация, в частности дендроиндикация — изучение состояния растительного покрова под действием внешних (абиотических) факторов [6]. При проведении дистанционных наблюдений состояние растительного покрова оценивается по фотосинтетически активной части электромагнитного излучения Солнца, поглощаемого растительностью, так называемому вегетационному индексу [7, 8]. Вегетационный индекс — широко используемый параметр отраженного земной поверхностью излучения [9]. Однако за более чем 30-летний период наблюдений не было установлено однозначной зависимости вегетационного индекса от уровня техногенного воздействия ввиду высокой естественной изменчивости состояния растительного покрова [10] и влияния на него изменений климата [11].

Исследование воздействия горнопромышленных предприятий на природную среду по данным дистанционных наблюдений с применением вегетационного индекса проводят на базе априорной информации о расположении источника техногенного воздействия [12] или на основе интегральной обработки нескольких спектральных показателей отражения от земной поверхности и атмосферы [13]. Второй вариант характеризуется большей объективностью, возможностью дифференцировать техногенные и естественные изменения растительного покрова. Повышение объективности наблюдений при интегральной обработке дистанционных данных способствует повышению достоверности прогноза техногенного воздействия на природную среду, в том числе при оценке границ импактных зон предприятий.

При прогнозировании техногенного воздействия на природную среду рационально учитывать причинно-следственные связи для уменьшения объема совместно обрабатываемых данных и повышения информативности комбинации дистанционных наблюдений. Известно, что состояние растительного покрова во многом определяется аэрозольным техногенным воздействием, что связано с изменением светового режима подстилающей поверхности, загрязнением почв при осаждении аэрозолей [14–17]. В этой связи разумно ожидать, что импактные зоны горнопромышленных предприятий будут характеризоваться как состоянием растительного покрова, так и наличием аэрозольного воздействия.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выбрана территория западной, наиболее освоенной части российского сектора Арктики (Кольский полуостров, Мурманская область). Большая часть территории (144.9 тыс. км²) находится севернее Полярного круга в Атлантико-Арктическом районе умеренного климата, отрицательных среднегодовых температур и избыточного увлажнения воздуха. Расположение предприятий Кольского горнопромышленного комплекса приведено на рис. 1 (топологическая основа рисунков — векторная карта VMAP0 [18]).

По территориальной близости можно условно выделить три горнопромышленных района: Северо-западный, Центральный, Юго-западный. Суммарный выброс загрязнений в атмосферу в горнопромышленных районах, согласно официальным данным, составляет 125, 61, 21 тыс. т/год соответственно, при этом доля аэрозольных выбросов равна 9.5 % [19].

ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБРАБОТКА

Для характеристики аэрозольного техногенного загрязнения и состояния растительного покрова использовались данные дистанционного наблюдения территории космическим аппаратом MODIS Terra за период 2000–2017 гг. [17]. Техногенное загрязнение определялось по величине аэрозольной оптической толщи, характеризующей ослабление света в атмосфере (MOD04_L2) [20].

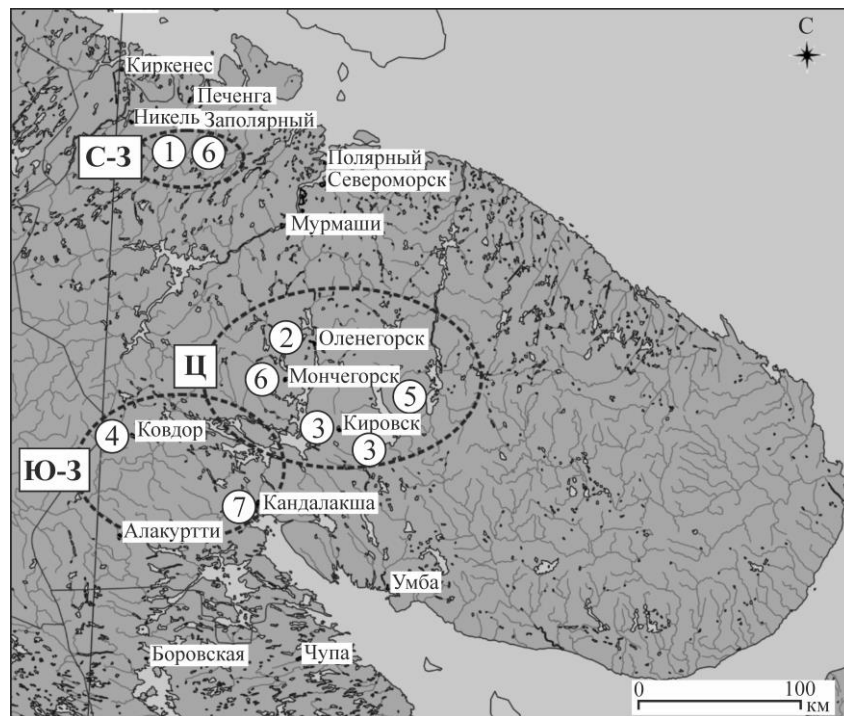


Рис. 1. Положение на территории Мурманской области предприятий Кольского горнопромышленного комплекса, осуществляющих добычу и обогащение руд: 1 — медно-никелевых; 2 — железных; 3 — апатит-нефелиновых; 4 — бадделейт-apatит-магнетитовых; 5 — редкометалльных; выплавляющих металлы: 6 — никель, медь; 7 — алюминий

Оценка состояния растительного покрова проводилась по вегетационному индексу MOD13Q1 [21] за период 2000–2017 гг. С целью исключения сезонной вариации вегетационного индекса и контроля видового состава растительности обработку данных выполняли по разработанному алгоритму, включающему: дешифрирование типа подстилающей поверхности, выделение мониторинговых полигонов площадью не менее 1 км^2 с однотипным растительным покровом, определение ежегодного максимального значения и ежегодного срока достижения максимального значения вегетационного индекса, их нормирование на фоновые значения, усреднение полученных показателей состояния растительного покрова за 18-летний период наблюдений [22]. Для дешифрирования типа подстилающей поверхности использованы синтезированные из мультиспектральных снимков Landsat 8 [23] за 2013–2017 гг. цветные изображения территории с пространственным разрешением 30 м, картографические материалы по территории Мурманской области, данные собственных полевых наблюдений. Статистические данные о мониторинговых полигонах, одиночно расположенных и групп горнопромышленных предприятий, приведены в таблице.

Ввиду значительного числа мониторинговых полигонов, обработка данных проводилась программным методом в среде R [24]. Применение разработанного алгоритма оценки состояния растительного покрова обеспечивает погрешность, не превышающую 3 %.

В случае одиночно расположенных предприятий в Юго-западном горнопромышленном районе: АО «Ковдорский ГОК», Кандалакшский алюминиевый завод — площадь техногенного воздействия на природную среду рассчитывалась по пространственной корреляции расположения мониторинговых полигонов со сниженным относительно фона вегетационным индексом и ускоренным выходом на его максимальное значение усреднением лагов вариограмм по восьми направлениям.

Статистические данные обработки дистанционных наблюдений вегетационного индекса

Предприятие	Мониторинговые полигоны		Число выделенных типов растительного покрова	Площадь, тыс. км ²
	Всего	С признаками угнетения растительного покрова		
Северо-западный район: АО “Комбинат Печенганикель” (п. Никель, п. Заполярный)	131	78	8	9.46
Центральный район: Оленегорский ГОК (г. Оленегорск), “Комбинат “Североникель” (г. Мончегорск), АО “Апатит” (г. Апатиты), ГОК “Олений ручей” (п. Коашва)	300	175	5	15.10
Юго-западный район: АО “Ковдорский ГОК” (г. Ковдор), Кандалакшский алюминиевый завод (г. Кандалакша)	100 70	36 21	6 4	1.46 2.95

Для предприятий Северо-западного (АО “Комбинат Печенганикель”) и Центрального горнопромышленных районов (Оленегорский ГОК, “Комбинат “Североникель”, АО “Апатит”, ГОК “Олений ручей”) определение импактных зон предприятий с признаками угнетения растительного покрова проводилось с применением геоинформационной системы QGIS [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одиночные источники техногенного воздействия. Для одиночных источников техногенного воздействия на природную среду наблюдается хорошее совпадение импактных зон аэрозольного техногенного воздействия и уменьшения вегетационного индекса (рис. 2).

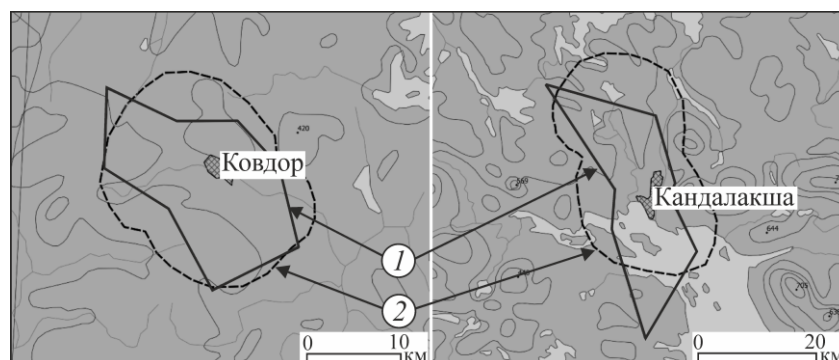


Рис. 2. Расположение границ импактных зон АО “Ковдорский ГОК” и Кандалакшский алюминиевый завод, выделенных по аэрозольному техногенному воздействию (1) и снижению вегетационного индекса (2)

Примечательно, что отрасль производства (АО “Ковдорский ГОК” — горнодобывающее, Кандалакшский алюминиевый завод — горно-металлургическое предприятие) существенно не влияет на соотношение площадей импактных зон, характеризующих действующую причину (аэрозольное техногенное загрязнение) и ее следствие — угнетение растительного покрова. Ориентация по розе ветров границ импактных зон, выделенных по снижению вегетационного индекса, соответствует ориентации зон, выделенных по аэрозольному техногенному воздействию, что подтверждает наличие причинно-следственной связи между наблюдаемыми факторами.

Отметим, что угнетение растительности в обоих случаях наблюдается и за пределами района аэрозольного техногенного воздействия, что объясняется высокой чувствительностью разработанного метода оценки изменения состояния растительного покрова.

Близко расположенные источники техногенного воздействия. Для предприятий АО “Комбинат Печенганикель”, расположенных на расстоянии 27 км, отмечается ситуация, аналогичная предыдущей: хорошее пространственное совпадение аэрозольного техногенного воздействия и уменьшения вегетационного индекса при большей площади реакции растительного покрова (рис. 3).

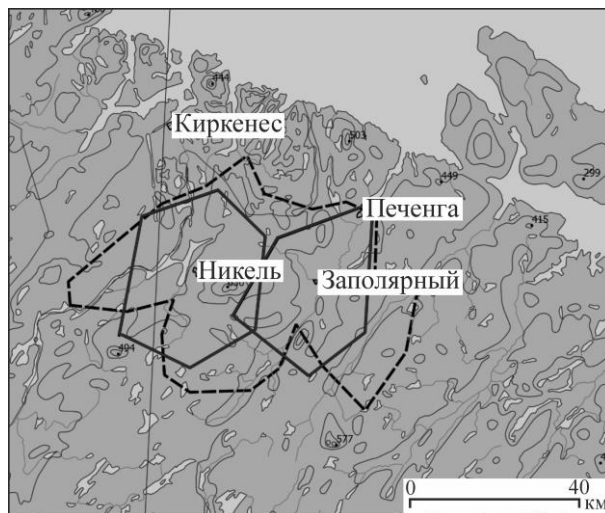


Рис. 3. Расположение границ импактных зон предприятий АО “Печенганикель” (п. Никель и п. Заполярный), выделенных по аэрозольному техногенному воздействию и по снижению вегетационного индекса (обозначения те же, что на рис. 2)

Установленные в [13] импактные зоны меньше по площади выделенных, но находятся в их границах, что объясняется различием в чувствительности методик обнаружения реакции растительного покрова на техногенное воздействие.

Несколько источников техногенного воздействия. Расстояние между соседними предприятиями Центрального горнопромышленного района не превышает 41 км, но ситуация отличается от предыдущей (рис. 4).

Зоны угнетения растительного покрова не везде соответствуют импактным зонам аэрозольного техногенного воздействия. Причиной этого может быть то, что в отличие от Северо-западного и Юго-западного районов, в Центральном горнопромышленном районе ветровой режим зависит не только от барического градиента, но в большей степени от местных особенностей рельефа. В известной мере это определяется влиянием Хибинского горного массива, который вызывает деформацию ветровых потоков по скорости и по направлению [26].

Из-за отсутствия значимого перекрытия необоснованно считать импактные зоны 1 и 2 зонами техногенного воздействия. В случае импактной зоны 2 угнетенное состояние растительного покрова обусловлено особенностями рельефа — расположением в северном предгорье Хибинского горного массива. Проявление причинно-следственной связи позволяет считать импактные зоны 3, 4 и 5 зонами техногенного воздействия на природную среду. В восточной части зоны 3 угнетение растительного покрова напрямую не сопровождается аэрозольным техногенным воздействием и связано с накопленным экологическим ущербом. Импактные зоны 4 и 5 включают промплощадку ГОКа “Олений ручей” и п. Ревда соответственно.

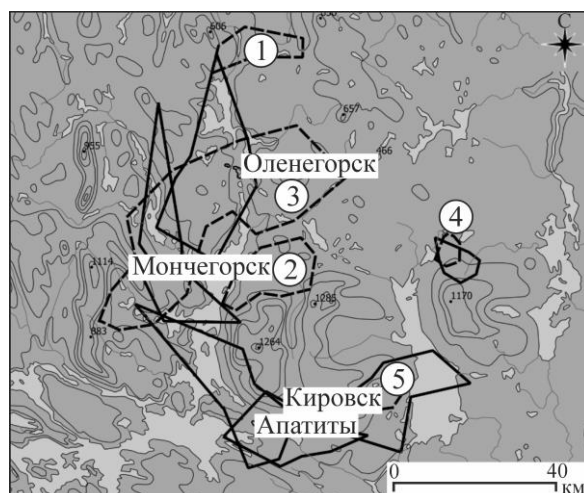


Рис. 4. Расположение границ импактных зон предприятий Центрального горнопромышленного района: АО “Оленегорский ГОК”, АО “Североникель”, АО “Апатит”, АО “Олений ручей”, выделенных по аэрозольному техногенному воздействию и снижению вегетационного индекса (обозначения те же, что на рис. 2)

Следует отметить отсутствие угнетения растительного покрова в импактной зоне аэрозольного техногенного воздействия АО “Апатит”. Наиболее вероятно, это связано с благоприятной для жизнедеятельности растений фосфатной составляющей аэрозольного техногенного загрязнения, сопровождающего добычу и переработку апатито-нефелиновых руд.

ВЫВОДЫ

Интегральная оценка аэрозольного техногенного загрязнения и реакции растительного покрова на основании спутниковых наблюдений прозрачности атмосферы (аэрозольной оптической толщи) и вегетационного индекса дает возможность более корректно прогнозировать воздействие предприятий на природную среду. Достоинствами предложенного подхода являются уменьшение объема обрабатываемых данных при повышении достоверности прогноза, исключение необходимости проведения наземных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jain R. K., Cui Z., and Domen J. K. Environmental impact of mining and mineral processing, Butterworth-Heinemann, 2016. — 307 p.
2. Chuvieco E. Fundamentals of satellite remote sensing, An environmental approach, CRC Press, 2016. — 457 p.
3. Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Быков А. А., Счастливцев Е. Л. Комплексный мониторинг техногенной нагрузки на атмосферу горнопромышленного региона // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 162–171.
4. Kar B. and Chow E. Fusion of multiscaled spatial and temporal data: techniques and issues, Integrating scale in remote sensing and gis. Quattrochi D. A., Wentz E. A., Lam Nina Siu-Ngan, Emerson C. W., CRC Press. Routledge, 2017. — P. 95–124.
5. Gamba P. and Dell'Acqua F. Data fusion related to GIS and remote sensing, Integration of GIS and Remote Sensing Edited by Victor Mesev, ohn Wiley & Sons Ltd, 2007. — P. 43–68.
6. Ловелиус Н. В. Изменчивость прироста деревьев. Дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. — Л.: Наука, 1979. — 232 с.

7. **Jordan C. F.** Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor, *Ecology*, 1969, Vol. 50, No. 4. — P. 663–666.
8. **Rouse Jr J. W., Hass R. H., Schell J. A., and Deering D. W.** Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Proc. 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium, Washington, NASA Goddard Space Flight Center, 1974, Vol. 1. — P. 309–317.
9. **Boyd D. S. and Danson F. M.** Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development, *Progress in Physical Geography*, 2005, Vol. 29. — P. 1–26.
10. **Wessels K. J., Prince S. D., Frost P. E., and van Zyl D.** Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series, *Remote Sens Environ*, 2004, 91 (1). — P. 47–67.
11. **Conijn J., Bai Z., Bindraban P., and Rutgers B.** Global changes of net primary productivity, affected by climate and abrupt land use changes since 1981, Towards mapping global soil degradation. Report 2013/01, ISRIC–World Soil Information, Wageningen. ISRIC Report 1.
12. **Kalabin G. V.** Qualitative assessment of vegetation in disturbed mining-and-metallurgical areas by the remote and surface monitoring, *J. of Mining Science*, 2011, Vol. 47, No. 4. — P. 539–546.
13. **Bondur V. G. and Vorobev V. E.** Satellite monitoring of impact Arctic Regions, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51, No. 9. — P. 949–968.
14. **Yue X. and Unger N.** Aerosol optical depth thresholds as a tool to assess diffuse radiation fertilization of the land carbon uptake in China, *Atmos. Chem. Phys.*, 2017, No. 17. — P. 1329–1342.
15. **Xiao X., Braswell B., Zhang Q., Boles S., Frohling S., Moore III B.** Sensitivity of vegetation indices to atmospheric aerosols: continental-scale observations in Northern Asia, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 84. — P. 385–392.
16. **Mesyats S. and Ostapenko S.** Satellite data based assessment of environment impact of mining industry, *Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 2017, Vol. 17, No. 41. — P. 551–558.
17. **Месяц С. П., Остапенко С. П., Зорин А. В.** Методический подход к оценке аэрозольного техногенного загрязнения по данным спутниковых наблюдений на примере горнопромышленного комплекса Мурманской области // *Горн. пром-сть*. — 2016. — № 6. — С. 69–73.
18. **National Geospatial-Intelligence Agency (USA).** <http://gis-lab.info/qa/vmap0.html>.
19. **Ежегодные доклады о состоянии окружающей среды Мурманской области.** <http://www.gov-murman.ru/region/environmentstate>.
20. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota** (<https://lpdaac.usgs.gov>). doi: 10.5067/MODIS/MOD04_L2.006.
21. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota** (<https://lpdaac.usgs.gov>). doi: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006.
22. **Месяц С. П., Остапенко С. П., Аверина О. В.** Методический подход к оценке влияния горнопромышленных предприятий на состояние растительного покрова по данным спутниковых наблюдений // *ГИАБ*. — 2017. — № 10 (спец. выпуск 23). — С. 545–553.
23. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota** (<https://landsat.usgs.gov>).
24. **R Development Core Team.** R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2008. <http://www.R-project.org>.
25. **QGIS Development Team.** QGIS Geographic Information System, Software Version 3.0.2. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
26. **Талалаев С. М.** Метеорологические условия пылеобразования на хвостохранилище // *Труды ГГО*. — 1986. — Вып. 502. — С. 101–108.

Поступила в редакцию 31/V 2018