

Закономерности сезонных циклов вегетационного индекса экосистем в районе Сорского горно-металлургического комплекса

С.Г. Крицук¹, В.И. Горный¹, Г.В. Калабин², И.Ш. Латыпов¹

¹ ФГБУН Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН
197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18
E-mail: v.i.gornyy@ecosafety-spb.ru

² Институт проблем комплексного освоения недр РАН
111020, г.Москва, Крюковский туп., д.4
E-mail: kalabin.g@gmail.com

Рассмотрена пространственно-временная изменчивость нормализованного дифференциального вегетационного индекса (НДВИ) в районе Сорского (Хакасия) горно-металлургического комплекса (ГМК). Выявлены закономерные циклические сезонные изменения НДВИ. Высказана гипотеза о сокращении вегетационного периода экосистем под влиянием техногенной нагрузки ГМК. Для формализации методов анализа циклических изменений НДВИ предложено использовать полиномы Чебышева. Моделирование сезонного хода НДВИ показало, что за сокращение вегетационного периода в сезонном ходе НДВИ отвечает третий коэффициент ряда Чебышева. В результате на карте значений третьего коэффициента полинома Чебышева, построенной путем аппроксимации сезонного хода НДВИ, отмечена аномальная зона вокруг Сорского ГМК. Эта зона интерпретирована как результат воздействия ГМК на окружающие экосистемы.

Ключевые слова: Сорск, горно-металлургический комплекс, техногенная нагрузка, экосистема, реакция, спутник, вегетационный индекс, фенология, закономерности, формализация, карта.

Введение

Добыча и переработка полезных ископаемых относится к отраслям ресурсопотребления, что традиционно связано с образованием большой массы отходов.

Воздействие горно-металлургического производства на окружающую среду, в отличие от большинства других отраслей промышленности, носит объемный характер, существенно видоизменяя литосферу, гидросферу, атмосферу, а также почвенный покров и естественную биоту. При этом отвалы горных пород хранятся длительное время, что приводит к развитию активных процессов миграции химических элементов и стокам растворенных веществ.

Защита естественной биоты Земли от последствий техногенного изменения ее недр и составляет содержание понятия экологической безопасности освоения недр. Первочередное значение имеет разработка методологии количественной оценки экологической опасности техногенного воздействия (а значит, и степени экологической безопасности технологий освоения недр) не по величине воздействия, а по интегральной реакции экосистем на воздействие. В соответствии с этой идеологией необходимо изучить реакцию экосистем на техногенное воздействие. Учитывая значительные размеры площадей, занятых отвалами горнодобывающих предприятий, мониторинг их воздействия на природную среду

целесообразно выполнять с широким привлечением методов дистанционного зондирования Земли. При этом в соответствии с генеральным научно-техническим направлением в области дистанционного зондирования Земли, предложенным и развивающимся ИКИ РАН, необходимо разработать максимально автоматизируемые алгоритмы анализа материалов дистанционного зондирования.

Целью данной работы является разработка алгоритма формализованного анализа пространственно-временных циклических изменений НДВИ, вызванных воздействием Сорского ГМК.

1. Материалы и методы

1.1. Характеристика объекта исследований

Сорский ГМК расположен в Усть-Абаканском районе Хакасии в 105 км к северо-западу от Абакана. Сорск находится в основании Батеневского кряжа – мощного восточного отрога Кузнецкого Алатау, на границе степной и горно-таежной зон. Спецификой рассматриваемой территории является высотная зональность – закономерная смена экосистем с ростом высоты. Степной пояс представлен луговыми, солончаковыми, каменистыми подтипами. Лесостепной пояс – березовыми и лиственничными лесами, степями, лесостепями, оstepненными территориями и долинными лугами. Подтаежный – сосновыми, березовыми и лиственничными лесами, лесными лугами, луговыми каменистые степями. Таежный – кедрово-пихтовой и кедрово-пихтово-лиственничной тайгой, еловыми лесами, лесными лугами. Высокогорный – тундрами и альпийскими лугами и кустарниками (Куминова и др., 1976).

В горах существенную роль в формировании экосистем играют ориентация и углы склонов (Куминова и др., 1976). Северные склоны более влажные, лес там с большей полнотой, таежного типа, с моховым покровом. На северных склонах чаще наблюдается «черневая» тайга. Южные склоны более сухие, леса более разреженные с травянистым покровом (Куминова и др., 1976).

Летом климат территории характеризуется поступлением влажных воздушных масс с запада и севера, что обеспечивает в этот период основной годовой объем (до 60%) осадков. Напротив, осенью–зимой – весной (сентябрь–май) наблюдается юго-западный перенос воздушных масс и устанавливается антициклон с незначительными осадками и большим количеством солнечных дней. Непосредственно район Сорского ГМК (долина рек Бюря и Уйбата) отличает, по мнению А.В. Куминовой, антициклональный тип климата, поскольку она находится в ветровой тени влажных северных и западных ветров. Климат здесь наиболее сухой по сравнению с остальной территорией, а растительность имеет более выраженный степной характер (Куминова и др., 1976).

Молибденовое месторождение было открыто в 1910–1937 гг. Строительство Сорского ГМК – в 1949 г. Добыча – в 1950 г. В 1955 г. была запущена первая очередь обогатительной фабрики. В последующие годы комплекс расширялся, и в 1989 г.

производительность обогатительной фабрики достигла 9 млн тонн в год. Ферромолибденовый завод проектной мощностью около 4 500 тонн в год был пущен в эксплуатацию в 2006 г.

1.2. Спутниковые материалы

Анализировались цифровые карты НДВИ, представляющие собой стандартный продукт (уровень L3) в виде 16-дневного цифрового композита с геометрическим разрешением на местности не лучше 250 м. Карты подготовлены по материалам съемок спутниками Terra (MODIS)/Aqua(MODIS) (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>). Эти карты были подобраны за каждый 16-дневный цикл на периоды с 1 мая по 30 сентября на каждый год с 2000 по 2011 гг. (*табл. 1*). Всего было подобрано (10 сезонов) * (11 лет) = 110 карт НДВИ. В качестве картографической основы приняты: цифровая карта России 1:1 000 000 (USGS); цифровая модель рельефа миссии «Шаттл» – SRTM (<http://www.cgiar-csi.org/data/elevation/item/45-srtm-90m-digital-elevation-database-v41>).

Для анализа закономерностей пространственно-временных вариаций НДВИ использовалась цифровая карта растительного покрова России с разрешением 250 м, составленная ИКИ РАН по спутниковым и наземным данным (Барталев и др., 2011).

Таблица 1. Оценка качества 16-дневных композитов НДВИ:
1 – хорошо, 2 – удовлетворительно, 3 – плохо, 4 – очень плохо

<i>Год/день года</i>	<i>129</i>	<i>145</i>	<i>161</i>	<i>177</i>	<i>193</i>	<i>209</i>	<i>225</i>	<i>241</i>	<i>257</i>	<i>273</i>
<i>2000</i>	3	3–4	1	1	3	3	1	2	2–3	1
<i>2001</i>	2	3	4	1	2–3	1	1	2	3–4	2
<i>2002</i>	2	3	2	3	1	1	1	2–3	1	2
<i>2003</i>	3	1–2	1	1	2–3	2–3	2	2–3	2	2
<i>2004</i>	3	1	2	2	1	1	1	1	2	2
<i>2005</i>	3	3	1	1	2	1	1	1	1	2
<i>2006</i>	2	3	3	3	3	1	3	1	1	3
<i>2007</i>	1–2	1–2	3	2	1	2	1	1	1	1
<i>2008</i>	3–4	2	3–4	1	2	1	3–4	3–4	2–3	1
<i>2009</i>	2–3	2	4	3	4	3	3–4	1	1	1
<i>2010</i>	4	2	2	3–4	1	3	1	1	1	1
<i>2011</i>	1	1	1	1	2	2	3	1	1	1

1.3. Методика обработки

Количественная оценка состояния окружающей среды на территории размещения предприятия по спутниковым материалам проводилась по следующей методике. На первом этапе вокруг Сорского ГМК выделялись кольцевые концентрические зоны (*рис. 1*),

ограниченные окружностями с диаметрами: первая (внутренняя зона): от 0 до 5 км; вторая зона от 5 км до 8 км; – третья зона: от 8 км до 16,5 км; – четвертая зона: от 16,5 до 26,5 км; пятая зона: от 26,5 до 62 км; шестая зона: от 62 до 96 км. Ширина кольцевых зон увеличивалась от центра к периферии. Это сделано для того, чтобы более детально охарактеризовать изменчивость НДВИ в области его наибольших градиентов, которые расположены вблизи источника техногенной нагрузки. Водные объекты маскировались для минимизации их влияния на результат. После чего в кольцевых концентрических зонах в соответствии с картой растительного покрова выделялась область лесов. Внутри этих областей рассчитывались средние значения НДВИ для каждой концентрической кольцевой зоны.

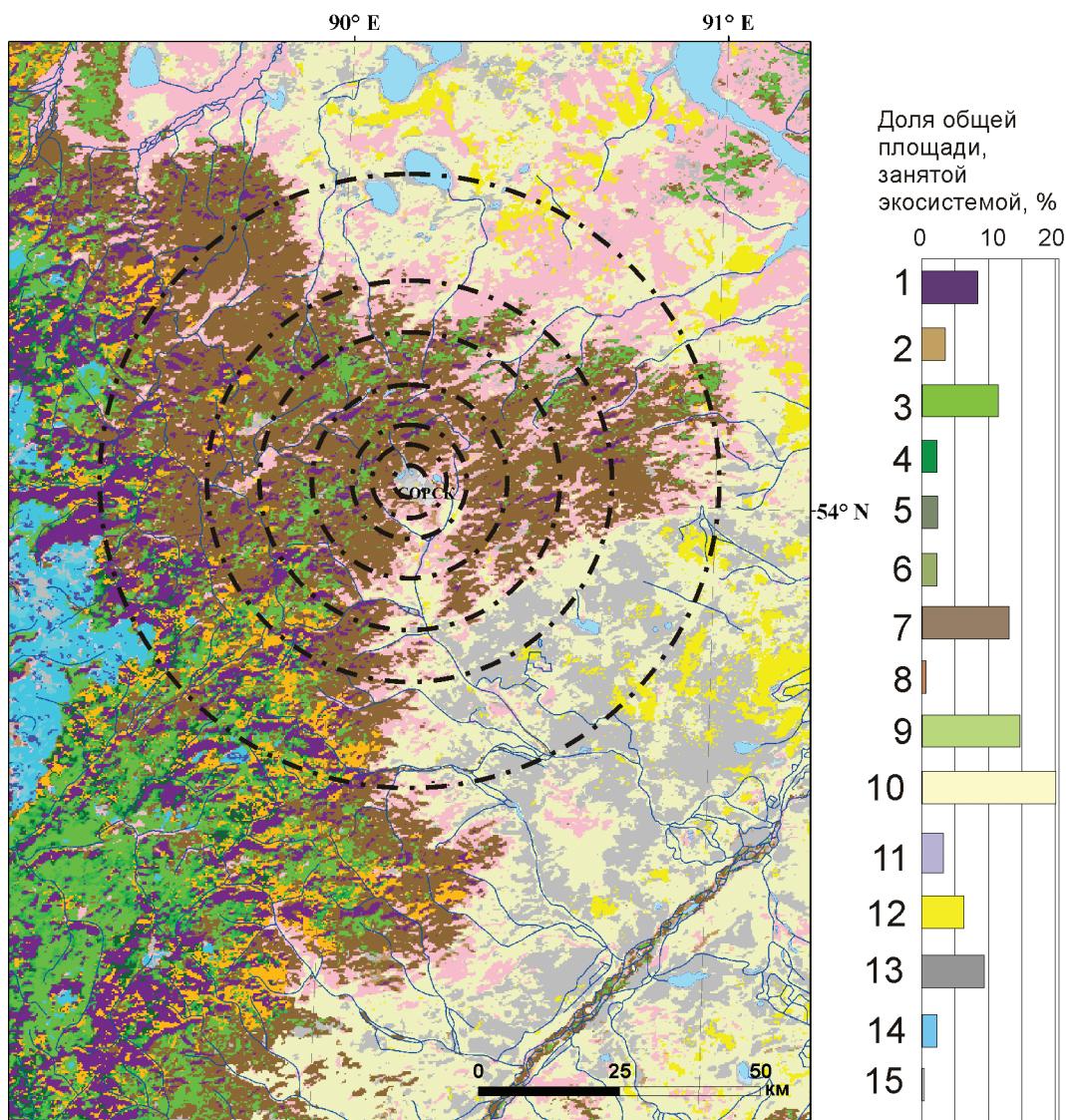


Рис. 1. Фрагмент карты растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS (Барталев и др., 2011) района Сорского ГМК с нанесенными кольцевыми зонами вокруг г. Сорска, для которых выполнялся анализ (штрих пунктирные линии). Условные обозначения: 1 – лес темнохвойный; 2 – лес светлохвойный; 3 – лес лиственничный; 4 – лес смешанный, преимущественно хвойный; 5 – лес смешанный; 6 – лес смешанный, преимущественно лиственничный; 7 – лес лиственничный; 8 – редколесье лиственничное; 9 – луга; 10 – степь; 11 – тундра; 12 – земли пахотные; 13 – обнажения горных пород; 14 – акватории; 15 – территории селитебные

Учитывая гигантскую выборку (большое количество пикселей (измерений), порядка 1000 и более) для каждой кольцевой зоны, средние значения НДВИ рассчитывались с чрезвычайно малыми случайными погрешностями. Поэтому, на результирующих графиках в силу их малости не показаны доверительные интервалы.

2. Результаты

На первом этапе в рамках кольцевого метода анализировались изменения НДВИ в зависимости от удаления от Сорска для двух типов экосистем: лесных и степных (*рис. 2*).

Общими чертами для лесных и степных экосистем являются: заметное снижение НДВИ весной и осенью по мере приближения к ГМК в зоне радиусом около 25–30 км (*рис. 2*); во второй половине июля такого понижения не наблюдается, а для степных экосистем в интервале от 50 км до 30 км по мере приближения к ГМК даже наблюдается повышение НДВИ (*рис. 2б*).

Таким образом, отсутствует устойчивая для всех сезонов года зависимость НДВИ от расстояния до Сорского ГМК.

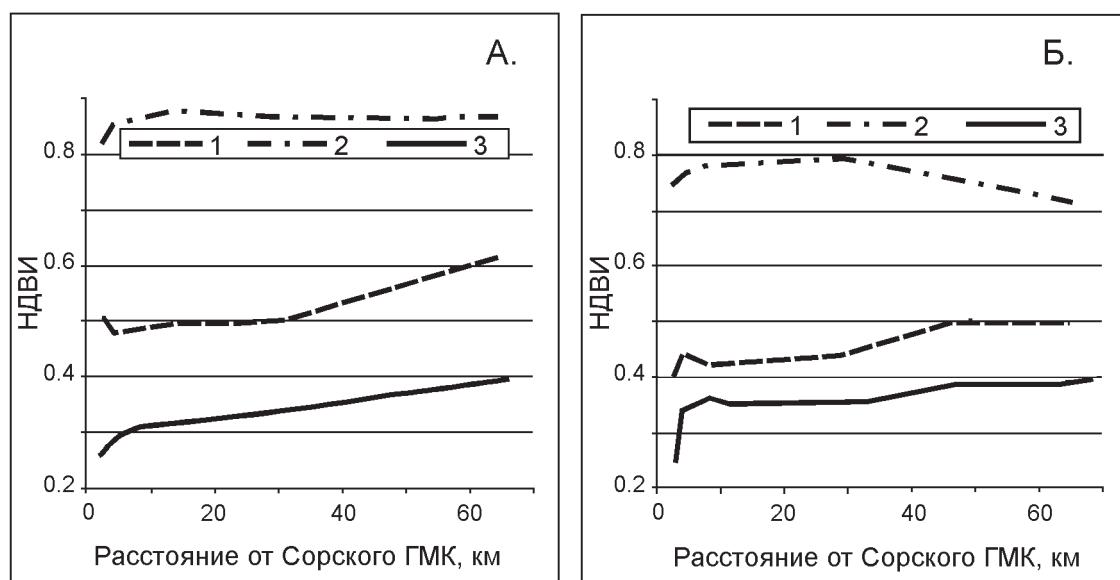
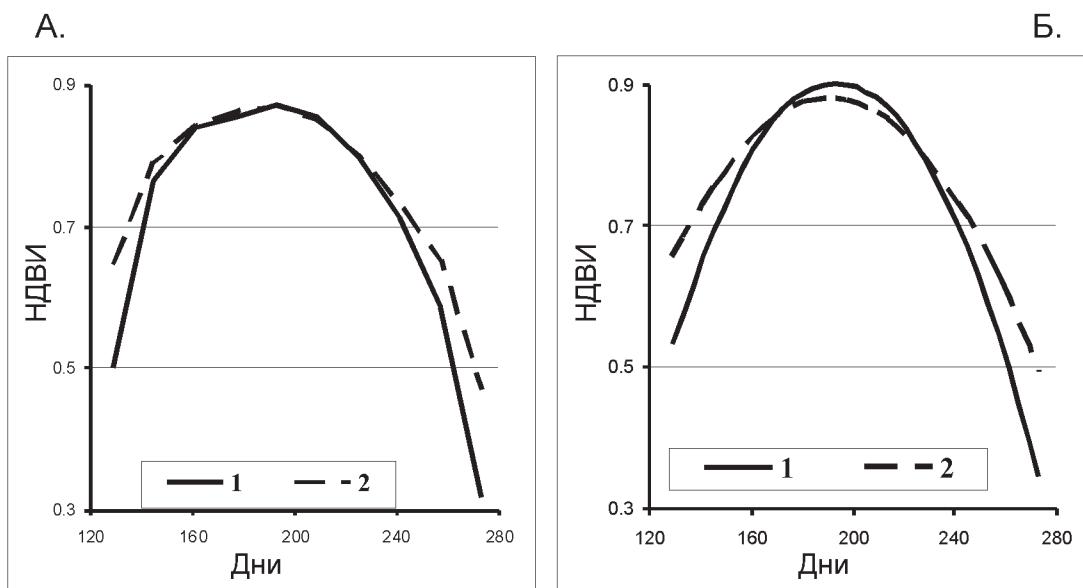


Рис. 2. Характерные для периода с 2000 по 2012 г. изменения НДВИ в зависимости от удаления от Сорска: А – лиственничные леса; Б – степи.

Условные обозначения: 1 – первая половина мая 2007 г.;
2 – вторая половина июля 2007 г.; 3 – вторая половина сентября 2007 г.

Анализ же сезонных циклов изменчивости НДВИ (*рис. 3*) показал, что для экосистем, расположенных во внутренней области (диаметр 50 км) наблюдается более позднее развитие вегетации и более раннее ее завершение (*рис. 3*). Этим и объясняется отмеченное выше отсутствие всесезонной закономерности в понижении НДВИ в области, примыкающей к Сорскому ГМК. В связи с этим была высказана гипотеза, что техногенное воздействие Сорского ГМК на окружающие экосистемы проявляется в сокращении вегетационного периода растительных сообществ.



*Рис. 3. Сезонный цикл НДВИ лесных экосистем в районе Сорского ГМК в 2007 г.:
 А – измеренный; Б – модельный, построенный с использованием первых четырех коэффициентов полинома Чебышева (значения коэффициентов приведены в табл. 2).
 Условные обозначения: 1 – внутренняя область (внутри круга диаметра 50 км);
 2 – внешняя область (за пределами круга диаметра 50 км)*

3. Обсуждение результатов

Для более детального анализа справедливости высказанной гипотезы было применено разложение сезонного хода НДВИ экосистем в районе Сорского ГМК в полиномы Чебышева:

$$НДВИ(d) = \alpha_1 + \alpha_2 * x + \alpha_3 * (2 * x^2 - 1) + \alpha_4 * (4 * x^3 - 3 * x),$$

где: $x = 2 * (d - d_s) / (d_l - d_s) - 1$; d – день с начала года; d_s – день начала измерений; d_l – день окончания измерений; α_1 , α_2 , α_3 и α_4 – коэффициенты первых четырех членов полинома Чебышева.

Для этого, по сезонным вариациям НДВИ, зарегистрированным в 2007 г. (*рис. 3а*), были определены четыре коэффициента полинома Чебышева для экосистем внутренней (внутри окружности диаметра 50 км) и внешней (по отношению к окружности диаметра 50 км) зон вокруг Сорского ГМК (*табл. 2*). После чего был выполнен прямой (модельный) расчет сезонного хода НДВИ с использованием только этих четырех коэффициентов (*рис. 3б*), что позволило «очистить» сезонный ход НДВИ от влияния факторов малого порядка и тем самым заметить основные закономерности.

Для понимания физического смысла изменения формы кривой сезонного хода НДВИ в зависимости от первых четырех коэффициентов полинома Чебышева при изучении реакции растительных сообществ на воздействие Сорского ГМК были проведены дополнительные модельные расчеты, результаты которых приведены на *рис. 4*.

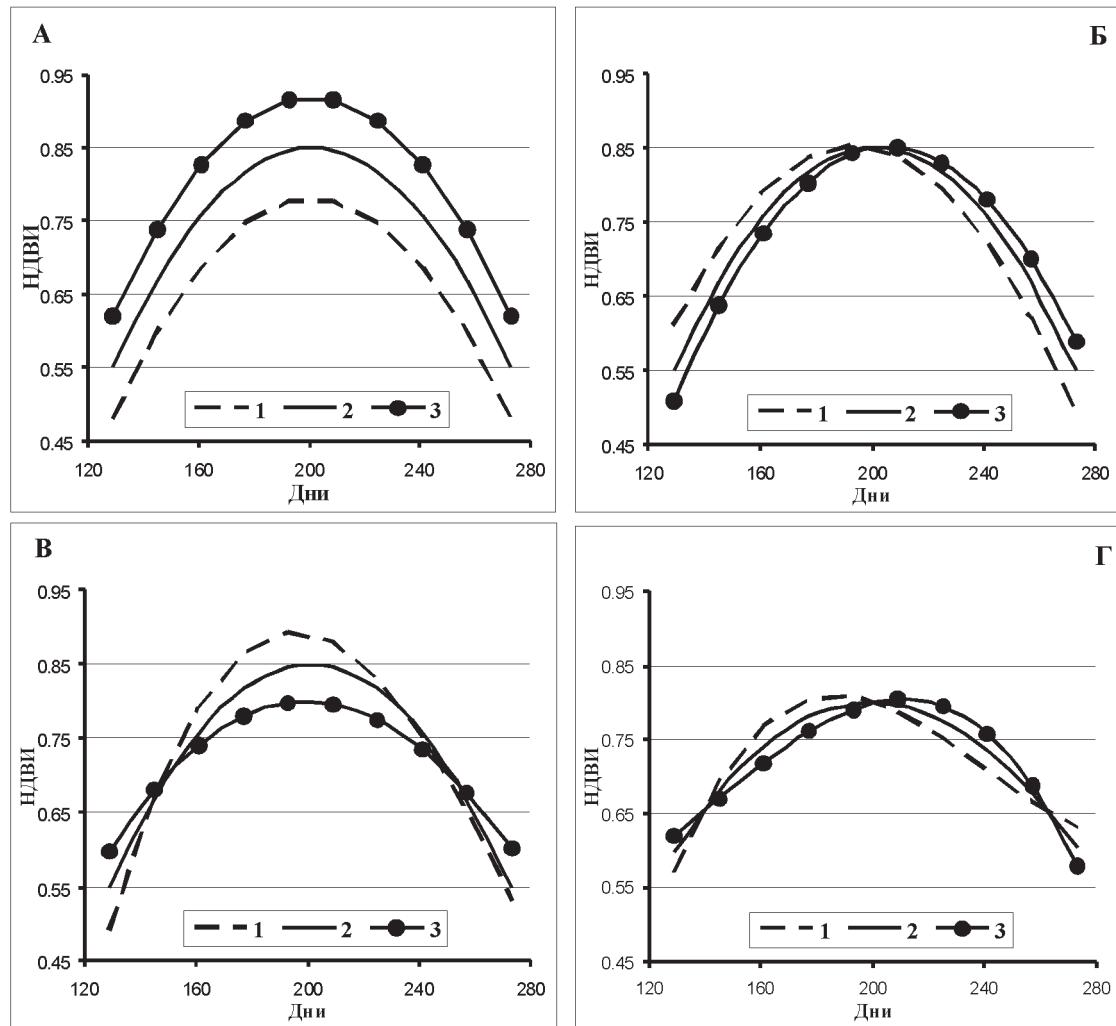


Рис. 4. Результаты математического моделирования сезонного хода НДВИ лесных экосистем полиномом Чебышева:

А – вариации 1-го коэффициента. Условные обозначения (в скобках указаны значения первых трех коэффициентов полинома Чебышева):

- 1. (0,63; 0; 0,15) 2. (0,7; 0; 0,15) 3. (0,77; 0; 0,15);*

Б – вариации 2-го коэффициента. Условные обозначения: 1. (0,7; 0,06; 0,15).

- 2. (0,7; 0; 0,15). 3. (0,7; 0,04; 0,15);*

В – вариации 3-го коэффициента. Условные обозначения: 1. (0,7; 0; 0,19).

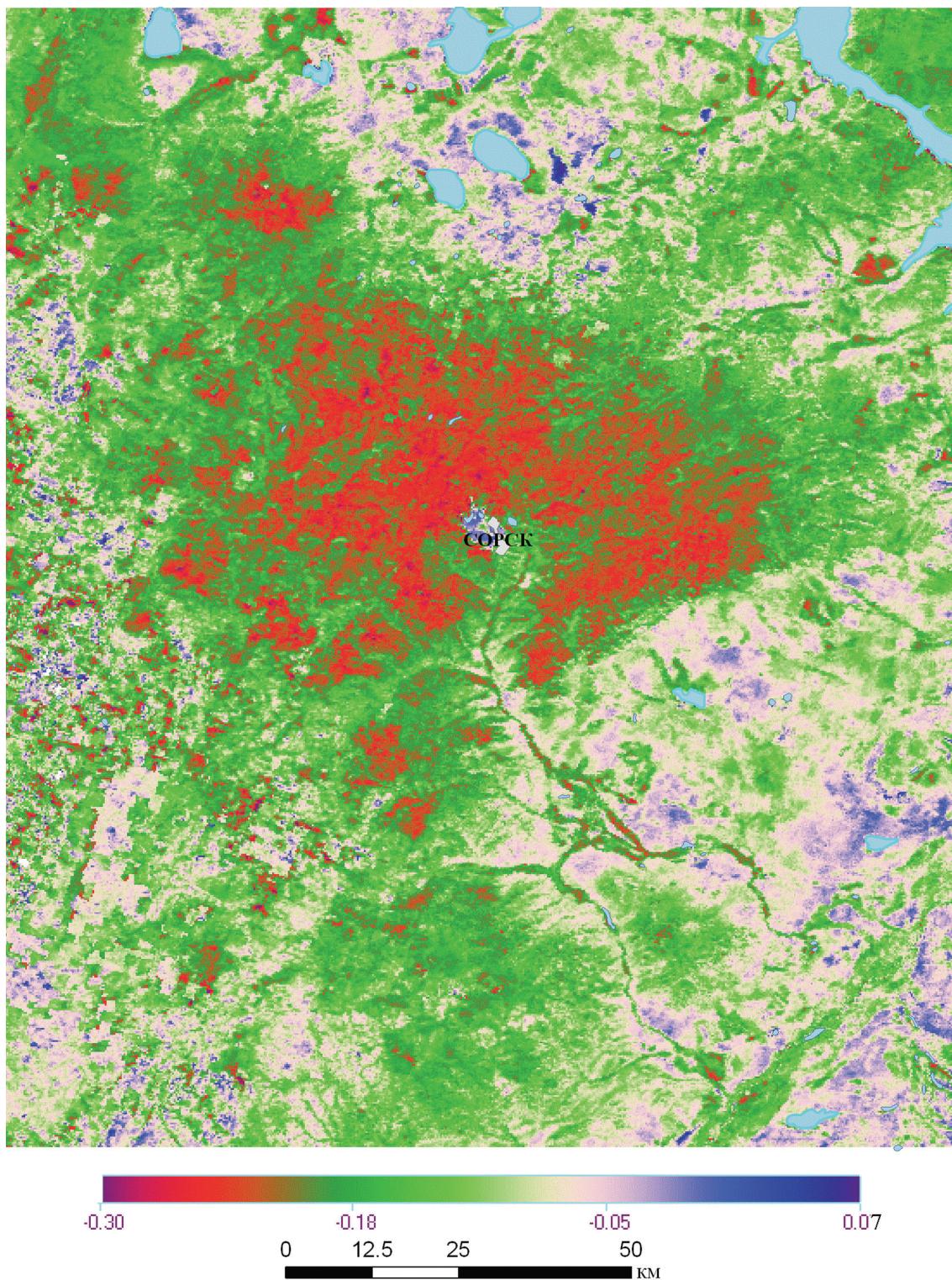
- 2. (0,7; 0; 0,15). 3. (0,7; 0; 0,1);*

Г – вариации 4-го коэффициента. Условные обозначения (в скобках указаны значения первых четырех коэффициентов полинома Чебышева):

- 1. (0,7; 0; 0,1; 0,02) 2. (0,7; 0; 0,1; 0) 3. (0,7; 0; 0,1; 0,03)*

Таблица 2. Средние коэффициенты полиномов Чебышева для лесных экосистем вокруг Сорского ГМК по данным за 2007 г.

<i>Зоны вокруг Сорского ГМК</i>	<i>Коэффициенты полиномов Чебышева</i>			
	α_1	α_2	α_3	α_4
Внутренняя зона (диаметр менее 50 км)	0,67	-0,094	-0,23	0,010
Внешняя зона (за пределами внутренней зоны)	0,72	-0,082	-0,15	0,003



*Рис. 5. Карта 3-го коэффициента полинома Чебышева в 2007 г.
района Сорского ГМК*

Результаты сгруппированы так, чтобы на каждом рисунке менялся лишь один из коэффициентов.

Как следует из результатов моделирования (*рис. 4*), первый коэффициент полинома Чебышева «отвечает» за средний уровень НДВИ за период измерений. Второй – за время начала вегетации (фенофазовый показатель). Третий – за продолжительность вегетационного периода. Чем меньше третий коэффициент полинома Чебышева, тем короче вегета-

ционный период. Четвертый – за нарушения нормального сезонного хода НДВИ, которое может быть связано, например, с сенокосом или уборкой зерновых.

В соответствии с этим, карты 3-го коэффициента были использованы для выявления зоны возможного влияния Сорского ГМК. Как отмечалось выше, значения НДВИ весной и осенью во внутренней 50 км зоне ниже, чем на остальной территории и, следовательно, должен быть ниже и 3-й коэффициент полинома Чебышева. Климатические корреляции 3-го коэффициента оказались незначимыми, также как, и второго. Значения первого и особенно третьего коэффициентов во внутренней зоне оказались существенно пониженными. Зона пониженных значений 3-го коэффициента, окружает Сорск кольцом, разомкнутым на юге долиной реки Бюри (*рис. 5*).

Анализ результатов показывает, что в районе Сорского ГМК наблюдается специфика сезонной цикличности НДВИ, проявляющаяся в сокращении периода вегетации растительных сообществ. Причинами этой специфики могут быть:

- техногенное воздействие Сорского ГМК на окружающие экосистемы;
- более сухой климат (см. выше) в долине, где расположен Сорский ГМК.

Выяснение, какой из этих возможных факторов является главным, требует дополнительных исследований.

Заключение

Разработан новый методический прием анализа сезонных циклов НДВИ, основанный на использовании полиномов Чебышева.

Достоинствами данного методического приема являются:

1. Минимум предварительной информации, требующейся для реализации предложенного алгоритма.
2. Возможность полной автоматизации обработки спутниковых материалов с целью выявления области и степени реакции экосистем на техногенное воздействие.

Литература

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
2. Куминова А.В., Зверева Г.А., Маскаев Ю.М., Павлова Г.Г., Седельников В.П., Королева А.С., Нейфельд Э.Я., Танзыбаев М.Г., Чижиков Н.М., Ламанова Т.Г. Растительный покров Хакасии. Новосибирск: Наука, 1976. 423 с.

Regularities of Vegetation Index Annual Cycles in the Region of Sorsk Mining & Metallurgical Complex

S.G. Kritsuk¹, V.I. Gornyy¹, G.V. Kalabin², I.Sh. Latupov¹

¹ *Scientific Research Centre for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences
18 Korpusnaya Str., Saint-Petersburg, 197110, Russia*

E-mail: v.i.gornyy@ecosafety-spb.ru

² *Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
4 Kryukovsky Tupik, Moscow, 111020, Russia*

E-mail: kalabin.g@gmail.com

The spatial & temporal variations of normalized differential vegetation index (NDVI) in the region of Sorsk mining & metallurgical complex (MMC) (Siberia, Russia) were investigated. Seasonally regular cycle changes of NDVI were discussed. The hypothesis about vegetation period shortening as the result of the technogenic loading of Sorsk MMC was expressed. It was suggested to use the Chebyshev polynomials as the formal tool for NDVI season variations analyzes. The mathematical simulations of NDVI season variations exhibited that the third coefficient of Chebyshev polynomials indicates shortening of forest ecosystem vegetation period. As the result, the big negative anomaly of the third Chebyshev polynomials surrounds the Sorsk MMC at the map compiled by using the approximation of NDVI season variations by Chebyshev polynomials. This anomaly was interpreted as the result of Sorsk MMC loading on the surrounding forest ecosystems.

Keywords: Siberia, mining industry, technogenic loading, ecosystem, reaction, satellite, vegetation index, phenology, regularities, formalization, map.