

Опыт применения данных нерегулярных спутниковых наблюдений для многолетнего мониторинга благополучия фитоценозов в зонах повышенной радиационной опасности

К. Ю. Силкин¹, А. Н. Кизеев²

¹ Воронежский государственный университет, Воронеж, 394018, Россия
E-mail: const.silkin@mail.ru

² Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина
Кольского научного центра РАН, Анатимы, 184209, Россия
E-mail: aleksei.kizeev@mail.ru

Разработана и апробирована методика оценки благополучия фитоценозов на основе многолетних, но нерегулярных по времени материалов дистанционного зондирования Земли. При изучении бореальных ландшафтов из космоса часто возникает проблема, связанная с исключительной редкостью совершенно безоблачных дней. В том случае, когда ежегодно требуется изучать не крупные, но многочисленные объекты, расположенные в определённой местности, нередко наблюдается ситуация, когда все эти объекты не видны одновременно среди просветов между облаками во время очередного пролёта спутника над ними. В результате, несмотря на то что такие космические аппараты, как Landsat, пролетают над каждой точкой земного шара приблизительно два раза в месяц, те наблюдения, которые удаётся получить для каждого объекта в отдельности, оказываются очень нерегулярными. В итоге к многолетнему мониторингу представляются немногочисленные данные, приходящиеся на разные части вегетационного периода. Такие наблюдения очень трудны для непосредственного сопоставления с течением времени. Для решения этой проблемы и была разработана предлагаемая методика, суть которой состоит в нахождении оценки ключевых параметров на пике вегетационного сезона по тем немногочисленным нерегулярным значениям, которые удалось получить. В данной работе таким ключевым параметром был выбран вегетационный индекс NDVI, однако в сходных фитоценозах предложенную методику можно применять и к другим аналогичным индексам. Испытание методики было впервые выполнено на примере системы стационарных мониторинговых площадок (представляющих собой черничные сосняки), которая была развёрнута в пределах 30-километровой зоны вокруг Кольской атомной электростанции — одного из потенциально опасных объектов ядерной энергетики Евро-Арктического региона. Полученные результаты позволили сделать выводы относительно пространственного и временного влияния АЭС на состояние окружающей природной среды.

Ключевые слова: Кольская атомная станция, фитоценозы, дистанционное зондирование, индекс NDVI, мониторинг, алгоритм

Одобрена к печати: 19.02.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-84-99

Введение

Мурманская область — опорный узел Арктики, район интенсивной производственной деятельности. Здесь расположены крупнейшие в стране горнодобывающие, обогатительные и металлургические предприятия. На территории региона также находится Кольская атомная электростанция (КоАЭС), которая является потенциальным источником повышенной радиационной опасности (Доклад..., 2015). КоАЭС — первая атомная станция России, построенная за Полярным кругом в 1973–1984 гг. Её установленная тепловая мощность составляет 5500 мВт, что соответствует электрической мощности 1760 мВт (в эксплуатации находятся четыре энергоблока с водо-водяными реакторами ВВЭР-440) (Кизеев и др., 2010).

При оценке современного состояния наземных фитоценозов, а также при выявлении закономерностей их пространственно-временной организации в условиях антропогенного воздействия особую актуальность приобретает изучение информации, полученной с помощью дистанционных методов о структуре и свойствах растительности (Пузаченко, Черненко, 2016). В последнее время в анализе данных наблюдения за состоянием растительного покрова широко используется вегетационный индекс NDVI (Шовенгердт, 2013).

В процессе исследования благополучия лесных фитоценозов в ближней зоне КоАЭС по материалам дистанционного зондирования Земли с помощью миссии Landsat (NASA, США) встала проблема получения сопоставимого значения NDVI за разные годы в условиях очень нерегулярного и неравномерного наблюдения. Капризная северная погода крайне редко радовала нас безоблачными днями. Это могло быть обусловлено характерной особенностью погодных условий на территории Мурманской области — неустойчивостью и резкой изменчивостью, связанной с частой сменой воздушных масс, а также перемещением циклонов и обширных атмосферных фронтов, что, в свою очередь, приводило к преимущественному преобладанию общей облачности 8–10 баллов в течение всего года. Известно, что число пасмурных дней в году с покрытием небосвода облаками на 8–10 баллов может составлять не менее 169 дней (Яковлев, 1961). В связи с этим обстоятельством практически все измерения спектральных характеристик наземных объектов производились сквозь небольшие просветы в облаках. При этом не было никакой надежды получить одинаковое и в равной мере представительное число наблюдений каждого объекта за каждый сезон в течение всех лет мониторинга.

Исходя из вышесказанного, целью данной работы стала разработка алгоритма оценки величины индекса NDVI в пике вегетационного периода по тем нерегулярным наблюдениям, которые удавалось собрать за сезон, при допущении, что выпала удача получить космоснимок именно в день этого пика.

Обзор публикаций

Исследования многолетних зависимостей сезонных вариаций фенологических характеристик растительности из космоса проводятся уже не одно десятилетие. Однако, как было отмечено в диссертационной работе (Bhandari, 2011), большинство из них ограничены низким пространственным разрешением материалов дистанционного зондирования (например, данных радиометра AVHRR), которые подходят только для изучения феноменов от регионального до глобального масштабов. Редко можно встретить исследования по оценке трендов вегетационных свойств с использованием данных среднего пространственного разрешения (таких как Landsat TM/ETM+ и MODIS), обеспечивающих информацию для управления ресурсами в локальном или в региональном масштабе.

Одним из основополагающих исследований такого рода являются (Reed et al., 1994), где авторы определяли значения вегетационного индекса NDVI по данным спутника AVHRR (пространственное разрешение — 1 км). В ходе исследования были получены временные ряды NDVI за период с 1989 по 1992 г., по которым были сформулированы и определены 12 метрик, связанных с ключевыми фенологическими событиями флоры на территории США. Эти показатели включали в себя: дату появления зелени, дату пика NDVI, величину максимума NDVI, темп нарастания зелени, темп её увядания, интеграл NDVI и др. Для разных типов растительности были рассчитаны тренды и вариабельность этих метрик. Результаты анализа показали чёткое совпадение дистанционно полученных метрик и предсказанных с их помощью фенологических характеристик. Полученные результаты позволили осуществить картирование и мониторинг землепользования больших территорий.

Мы проанализировали наиболее интересные исследования по данной проблеме, касающиеся преимущественно северных районов планеты.

Исследование (Muneni et al., 1997) выявило, что наземная растительность усилила свою фотосинтетическую активность в период с 1981 по 1991 г. за счёт удлинения вегетационного

периода. Изучалась территория в северном полушарии, лежащая между 45-й и 70-й параллелями, на основании данных, полученных с помощью AVHRR (пространственное разрешение — 8 км, временное — 10 сут). Анализировалось пиковое значение NDVI, т. е. амплитуда сезонных колебаний графика NDVI. Обнаружено, что за выбранные годы произошло постепенное увеличение этого параметра на 7% на юге и до 14% на севере. Сходные результаты были получены в работе (Jia et al., 2003) при анализе 21-летней временной серии спутниковых данных по трём биоклиматическим зонам Северной Аляски. В качестве исходных данных использовались два набора данных: 1) с двухнедельной периодичностью за период 1990–2000 гг., с пространственным разрешением 1 км; 2) с месячной периодичностью за период 1981–2001 гг., с пространственным разрешением 8 км.

При анализе бореальной растительности в исследовании (Olthof et al., 2008) была поставлена цель согласовать полевые и дистанционные подходы благодаря использованию как материалов среднего (30 м, Landsat), так и низкого (1 км, AVHRR) пространственного разрешения при изучении 20-летнего отклика растительности на потепление северного климата. Однако из-за частой и сильной облачности в Северной Канаде за период с 1986 до 2006 г. удалось найти только пять совершенно чистых от облаков сцен вблизи даты пика вегетационного сезона. Тем не менее было отмечено, что многолетние тренды NDVI Landsat демонстрируют более быстрый рост, чем тренды NDVI, полученные на основе данных AVHRR, в связи с тем, что материалы более высокого пространственного разрешения позволяют качественнее фильтровать облака на изображении. С такими же проблемами столкнулись и к таким же выводам пришли авторы работы (Parent, Verbyla, 2010) при изучении северных еловых лесов Аляски. Для выявления наиболее активной части вегетационного периода использовались 15-дневные композиты, содержащие значения NDVI, максимальные за этот интервал. Композиты, в свою очередь, формировались по данным радиометра AVHRR с пространственным разрешением 4 км/пиксель. Далее была осуществлена попытка собрать для периода 19 июля – 8 августа максимум свободных от облаков сцен Landsat TM/ETM+. В силу частой сильной облачности наблюдения NDVI были редки и нерегулярны. Из 160 космоснимков Landsat TM/ETM+ оказались вовлечены в обработку лишь немногие, при том что кондиционными были признаны от 0,43 до 9,5% площади изображения на каждой сцене. При сравнении трендов NDVI по данным спутников AVHRR, MODIS и Landsat нередко обнаруживалась слабая корреляция между ними, что объясняется сильным «загрязнением» космоснимков облаками, от которого нельзя избавиться при использовании материалов низкого разрешения.

Таблица 1. Число наблюдений мониторинговых площадок в течение каждого года

Название	Описание	Код
Фон	Среднее между ближайшими зимними минимумами тренда	BAS
Максимум	Максимальное значение сезонного тренда	MAX
Амплитуда	Амплитуда сезона как разница между MAX и BAS	AMP
Начало сезона	Дата начала сезона, определяемая по пересечению аппроксимирующим полиномом отметки 25% от AMP весной	SOS
Конец сезона	Дата конца сезона, определяемая по пересечению аппроксимирующим полиномом отметки 25% от AMP осенью	EOS
Длина сезона	Разница между EOS и SOS	LEN
Скорость роста	Скорость весеннего роста как отношение разницы значений тренда на уровне 80 и 20% от AMP к разнице между датами, когда эти уровни достигаются весной	INC
Скорость спада	Скорость осеннего спада как отношение разницы значений тренда на уровне 20 и 80% от AMP к разнице между датами, когда эти уровни достигаются осенью	DEC
Сезонный интеграл	Площадь фигуры, ограниченной сверху аппроксимирующим трендом, снизу — линией BAS в интервале между SOS и EOS	INT

В упомянутой нами ранее работе (Bhandari, 2011) для оценки динамики лесной растительности по 16-дневным рядам NDVI, полученным с помощью материалов Landsat TM/ETM+, использовался набор фенологических метрик (табл. 1). В случае, когда по указанным выше причинам сцены Landsat оказывались недоступными, они заменялись синтетическим аналогом, сформированным на основе материалов более низкого пространственного разрешения.

Несмотря на все недостатки низкодискретных материалов, в последние годы они продолжают активно использоваться в исследованиях Севера (в отсутствие простой замены). Например, авторы работы (Jeganathan et al., 2014) построили 25-летние тренды NDVI, изучая особенности протекания сезонных фенологических процессов северной высокоширотной (более 45° с. ш.) наземной растительности по таким вегетационным характеристикам, как начало и конец сезона, а также амплитуда пика сезона. Исходными данными здесь послужили полученные со спутников ежедекадные значения NDVI по изучаемой территории. Данные брались из базы данных GIMMS, поддерживаемой Университетом Мериленда по материалам радиометра AVHRR. Пространственное разрешение анализа составляло 8 км. Были получены парадоксальные результаты, согласно которым вегетационные сезоны со временем начинаются всё раньше, а заканчиваются всё позже. Однако амплитуда сезонного тренда в пределах каждой широтной зоны, если пренебречь небольшими флуктуациями, сохраняется неизменной, что может поставить под сомнение примитивную модель глобального потепления как простого роста средней температуры.

Сезонную продуктивность северных лесов оценивали с помощью спутникового дистанционного зондирования (Jeong et al., 2017). Для изучения экосистем северных лесов Евразии и Северной Америки в полосе 40–55° с. ш. использовались данные NDVI, полученные с помощью радиометра AVHRR и имеющие пространственное разрешение около 1100 м, а также данные NDVI (продукт MOD13C2) со спектрометрира MODIS, имеющие пространственное разрешение около 5600 м. При анализе усреднённых по пространственной сетке 1×1° и временному шагу 1 мес данных были получены типичные графики сезонного хода значений NDVI для изучаемых районов.

На основании упомянутых выше методик, в первую очередь аналогичных тем, что описаны в работе (Reed et al., 1994), была разработана и успешно применяется многими исследователями для анализа фитоценозов компьютерная информационная система Timesat, версия 3.3 которой уже доступна с 2017 г. (Eklundh, Jönsson, 2017). Программа Timesat предназначена для обработки временных рядов значений вегетационных индексов, полученных с помощью спутниковых спектральных измерений. Timesat реализует три метода обработки, основанных на среднеквадратичной регрессии наружной оболочки сезонных графиков вегетационных индексов. Использование при аппроксимации именно наружной оболочки объясняется тем, что все помехи, которые могут встречаться в рядах NDVI, смещены вниз. Timesat может обрабатывать только регулярную во времени последовательность изображений по изучаемой территории. Как число изображений, так и временной интервал между ними должен быть постоянным. Недостающие по любым причинам изображения надо обязательно заменять каким угодно способом.

Подытоживая обзор публикаций, можно сделать вывод, что при изучении состояния бореальной растительности всегда возникает проблема очень сильной «загрязнённости» космоснимков облаками. Причём, если на материалах среднего пространственного разрешения облачность прекрасно видна и приводит к отбраковке подавляющего числа доступных сцен или очень большой доли их площади, то низкодискретные данные зачастую дают некачественные материалы и, как следствие, заниженные оценки состояния растительности.

В связи с этой проблемой простая методика выявления и анализа сезонных и многолетних трендов вегетационных индексов, основанная на нахождении и измерении специфических фенологических метрик, при решении локальных задач нередко даёт сбой и требует уточнения.

Материалы

Вокруг КоАЭС для исследования её влияния на окружающую среду была развёрнута сеть мониторинга в виде радиально-концентрической системы из 12 стационарных площадок (рис. 1).

Данные площадки располагались в центральной части Мурманской области, в районе озёр Имандра и Верхняя Пиренга. Для них были выбраны места с максимально автоморфными условиями и однородным растительным покровом. По типу леса большинство площадок относятся к соснякам чернично-лишайниковым и соснякам зеленомошно-лишайниковым черничным (Аврорин и др., 1936; Нешатаев, Нешатаева, 2002; Самбук, 1932). Древостой характеризуется преобладанием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с участием других пород деревьев — гибридных форм берёзы повислой (*Betula pendula* Roth.) и берёзы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), а также ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.). В травяно-кустарничковом покрове на площадках доминируют представители рода *Vaccinium*, преимущественно черника (*Vaccinium myrtillus* L.). Встречаются брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), вороника (*Empetrum hermaphroditum* Lange ex Hageup), голубика (*Vaccinium uliginosum* L.) и багульник (*Ledum palustre* L.). В мохово-лишайниковом покрове доминируют лишайники *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar & Wezda и *Cadonia rangiferina* (L.) Weber ex. F. N. Wigg. Встречаются лишайники *Cladonia deformis* (L.) Hoffm. и *Cetraria islandica* (L.) Ach. На камнях обычна мозаика из накипных эпилитных лишайников родов *Bellemeera*, *Lecidea* и *Porpidia*. Из зелёных мхов характерны *Pleurozium schereberi* (Brid) Mitt. и *Hylocomnium splendens* Hedw.

Станционные площадки находятся в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) атомной станции С-1 (координаты 67,4666; 32,4451) и СЗЗ хранилища сухих слабоактивных отходов С-2 (67,4824; 32,4140).

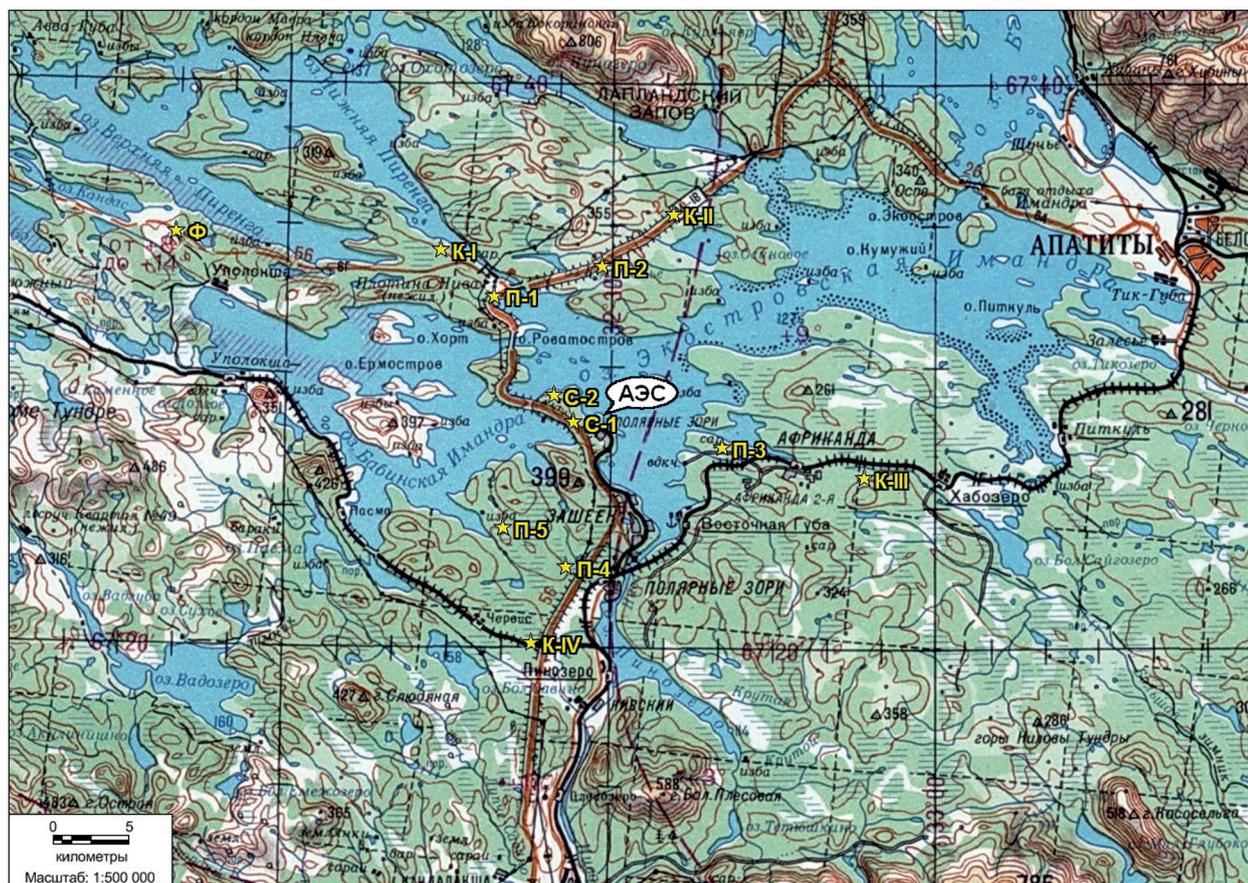


Рис. 1. Схема расположения мониторинговых точек вокруг КоАЭС

Пять пробных площадок расположены в зоне наблюдения (ЗН) КоАЭС на расстоянии 10 км от станции: П-1 (67,5411; 32,3204), П-2 (67,5590; 32,4879), П-3 (67,4520; 32,6735), П-4 (67,3808; 32,4350) и П-5 (67,4038; 32,3378); четыре контрольных площадки — на границе ЗН на расстоянии 15 км: К-I (67,5684; 32,2386), К-II (67,5903; 32,5967), К-III (67,4341; 32,8917) и К-IV (67,3358; 32,3835); а также одна фоновая площадка — на расстоянии 30 км от станции: Ф (67,5774; 31,8298). Размер каждой мониторинговой площадки — 1 га.

Архив материалов миссии космических аппаратов Landsat содержит множество сцен по изучаемому району. Из них были выбраны те, которые характеризуются достаточно низким процентом облачного покрытия территории, чтобы можно было рассмотреть между облаками хотя бы одну мониторинговую площадку. Кроме того, некоторые сцены (зарегистрированные в 1980-е гг.) имели высокую ошибку пространственной привязки. После уточнения по надёжным ориентирам такие сцены были исключены.

В результате было получено 189 сцен многозональных материалов программы Landsat, которые характеризуются следующими особенностями:

- поколения космических аппаратов: Landsat-4, -5, -7 и -8;
- временной диапазон: 1985–2017 гг.;
- сезонный охват: от последнего снега до первого снега (конец апреля — начало ноября).

Весь фонд собранных материалов представлен в *табл. 2*.

Таблица 2. Число наблюдений мониторинговых площадок в течение каждого года

Годы	Площадки											
	С-1	С-2	П-1	П-2	П-3	П-4	П-5	К-1	К-II	К-III	К-IV	Ф
1985	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
1986	6	6	5	6	6	4	6	4	3	4	6	3
1987	2	2	1	2	1	2	2	1	1	1	2	1
1988	8	8	7	6	7	6	7	3	6	6	5	3
1989	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1
1990	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
1998	4	4	4	3	4	3	4	4	3	3	2	1
1999	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2
2000	3	3	5	6	3	3	5	5	4	2	4	3
2001	2	2	3	3	2	4	4	4	4	3	3	3
2002	4	5	4	4	5	3	3	5	3	4	3	3
2003	1	1	1	1	2	2	0	1	1	2	1	2
2004	5	5	4	2	5	4	4	4	3	4	4	1
2005	7	7	8	6	7	5	7	7	6	7	8	4
2006	7	7	5	9	5	6	7	7	4	4	4	5
2007	4	4	6	5	5	4	2	4	4	4	3	3
2008	2	2	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0
2009	4	4	5	4	4	5	4	6	4	4	4	5
2010	4	4	2	3	3	2	2	3	0	4	3	2
2011	10	9	11	9	7	7	7	11	5	7	7	9
2012	1	1	1	0	2	1	1	0	0	2	1	1
2013	6	4	4	5	4	6	6	5	6	4	5	2
2014	9	11	12	9	4	6	8	10	8	7	8	7
2015	5	8	7	7	4	8	9	10	7	7	6	7
2016	14	13	13	10	16	10	10	12	10	12	11	12
2017	15	18	15	15	16	15	15	18	14	13	14	15

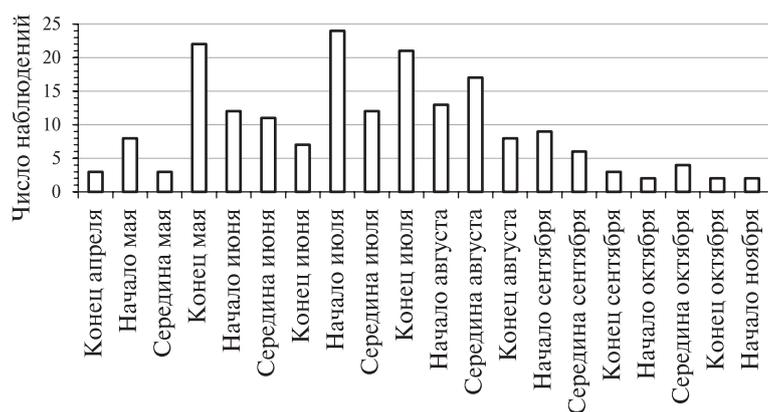


Рис. 2. Сезонное распределение наблюдений

Можно видеть, что в течение одного года число наблюдений разных площадок порой различается в несколько раз. Некоторые площадки в отдельные годы вообще не удалось рассмотреть на космоснимках.

Также выделяются «богатые» и «бедные» годы для наблюдений в целом. Например, очень мало качественных космоснимков было в 1985, 1987, 1989, 1990, 2008 и 2012 гг. В то же время в 1986, 1988, 2005, 2006, 2009 и 2015 гг. значительное

число мониторинговых площадок было зондировано более пяти раз за сезон, а в 2011, 2013, 2016, 2017 гг. — и более 10 раз. Рекордсменом в этом смысле стал 2017 г., когда наблюдения некоторых площадок производились до 18 раз. Также следует отметить, что в период 1991–1997 гг. из-за финансовых и технических проблем у миссии Landsat были пропуски с регистрацией изображений (Greenberg, Hertzfeld, 1992).

Далеко не всегда полученные наблюдения происходили вблизи даты пика вегетационного сезона. Осреднённое за все годы распределение наблюдений в пределах вегетационного сезона неравномерно и не близко к одномодальному нормальному закону (рис. 2).

Методы

Обработка многозональных космоснимков Landsat производилась в соответствии с официальным руководством миссии (https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf; http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php).

Прямое определение значения NDVI на пике сезона вегетации для данной мониторинговой площадки почти всегда бывает невозможным из-за практически случайного распределения доступных космоснимков во времени. Часто даже в «богатый» на исходные данные год все они могут оказаться кучно сосредоточенными в отдельной части сезона, не попадая на пик. Гораздо хуже ситуация в «бедные» годы, в которые надо предположить, как сложился сезон по одному-двум космоснимкам.

В связи с этим была предложена методика, состоящая из двух основных этапов: 1) определение формы среднесезонного тренда NDVI; 2) оценка значения NDVI для пика вегетационного периода, удовлетворяющего тренду, на основании доступных наблюдений.

В нашем примере вычисленные средние (по всем мониторинговым площадкам) значения NDVI были проанализированы на предмет определения формы содержащегося в них сезонного тренда. Лучше всего среднесезонные тренды видны при построении всех полученных значений NDVI в зависимости от номера дня в году (рис. 3, см. с. 91).

Были проведены многочисленные эксперименты по подбору наиболее оптимальной формы аппроксимирующей функции. В итоге выбор был сделан на простом полиноме второй степени, обеспечивающем коэффициент детерминации $R^2 = 0,76$, что говорит о высокой достоверности аппроксимации. Конечно, полином более высокой степени дал бы слегка лучшую подгонку, но это касалось бы почти исключительно мало интересующих нас ранней весны и глубокой осени.

Анализ рассматриваемого тренда позволил определить характеристики типичного хода графика NDVI. Это парабола с вершиной, приходящейся на 215-е сутки года (3 августа для невисокосного года). При этом тренд достигает высоты около 0,62. Остальные характеристики приведены в табл. 3 (см. с. 91).

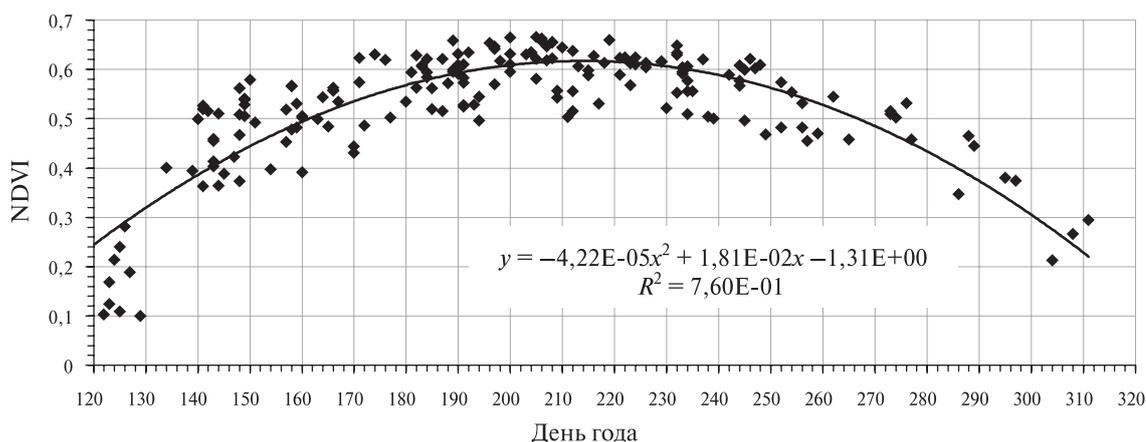


Рис. 3. Средние сезонные значения NDVI для всего периода наблюдений

Таблица 3. Параметры среднегоголетнего тренда

Фенологическая стадия	День года	Дата	NDVI
BAS	120	29 апреля	0,244
	310	6 ноября	0,228
SOS	135	15 мая	0,354
EOS	295	22 октября	0,340
20 % AMP	130	10 мая	0,319
	300	27 октября	0,305
80 % AMP	170	19 июня	0,535
	260	17 сентября	0,528
90 % AMP	185	4 июля	0,582
	245	2 сентября	0,577
MAX	215	3 августа	0,617

Согласно работам (Алисов и др., 1954; Справочник..., 1965), вегетационный период (со средней суточной температурой воздуха выше +5 °С) в районе наших исследований наступает в конце мая и заканчивается в конце сентября, составляя в среднем от 110 до 130 дней, т. е. от трёх до четырёх с половиной месяцев. Весна — начало биологической активности с устойчивым переходом средних суточных температур воздуха выше +5 °С. С этого момента начинается вегетационный сезон. Осенний период начинается в конце августа при устойчивом падении средней суточной температуры воздуха ниже +10 °С. Заканчивается осень в середине — конце октября. Можно видеть, что эти климатические сведения неплохо согласуются с характеристиками тренда, выявленного по данным NDVI.

Исследования, обзор которых был приведён выше, также содержат графики сезонных трендов подобной формы. Очевидно, что в зависимости от климатической зоны могут смещаться даты начала, пика и конца вегетационного периода, а также высота и крутизна кривой, но в целом тенденция сохраняется.

После вычитания из наблюдаемых данных выявленного среднегоголетнего тренда была оценена мера разброса значений около него. График коэффициента вариации был рассчитан в скользящем окне шириной в декаду (рис. 4, см. с. 92). Среднее значение по всему графику — 11,1%. Но за исключением ранней весны и поздней осени, когда наблюдений было мало, и того меньше — 9,2%. Следовательно, нет основания вслед за (Bhandari, 2011) предполагать, что и в нашем случае к пику вегетационного сезона можно отнести любое наблюдение, произошедшее между датами 80% AMP. Поэтому желательно ужесточить это требование до более узкого диапазона 90% AMP.

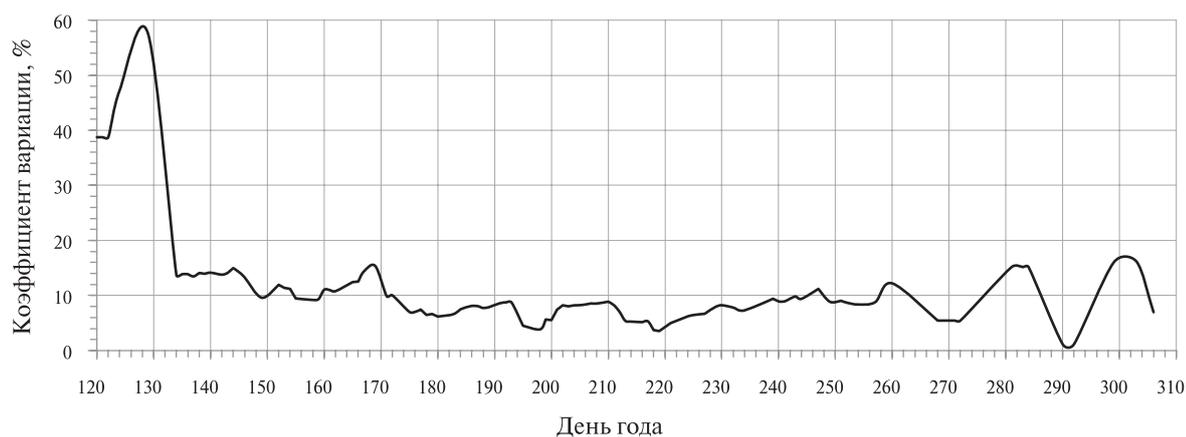


Рис. 4. График коэффициента вариации наблюдаемых значений NDVI относительно среднегодевного тренда при вычислении в скользящем десятидневном окне

Оценка значения NDVI для пика вегетационного периода выполняется приведённым ниже образом.

Осуществляется попытка сразу аппроксимировать все доступные по данной мониторинговой площадке значения с помощью параболы, которая производит модельное значение M_F для пика сезона. При этом проводится проверка на её соответствие следующим критериям:

- 1) модельная парабола направлена вершиной вверх;
- 2) оба значения модельной параболы на границах интервала дат 80 % AMP превышают значения среднегодевного тренда на границах 20 % AMP;
- 3) вершина модельной параболы лежит в пределах дат 90 % AMP;
- 4) вершина модельной параболы не отличается от MAX более чем на 10 % в меньшую сторону.

В том случае, если хотя бы одно из этих условий не выполняется, осуществляется попытка устранить из анализа наблюдения, которые наиболее сильно отстоят от среднегодевного тренда. Это исключение производится по одному в цикле (начиная с самого выдающегося) до тех пор, пока аппроксимирующая оставшиеся значения парабола не удовлетворит всем необходимым критериям.

Далее, независимо от результата предыдущего анализа, ко всем значениям, собранным для каждой мониторинговой площадки каждого года, применяется следующий алгоритм анализа данных:

1. Если большая часть данных лежит в пределах дат 90 % AMP, то за прогнозируемое значение M для пика сезона принимается среднее из этих значений — ${}^{90}M$ при условии, что оно не меньше M_F . В противном случае далее используется само значение M_F и алгоритм заканчивается.
2. В том случае, когда лишь меньшая часть данных лежит внутри интервала дат 90 % AMP, найденное значение ${}^{90}M$ сохраняется (если, конечно, было зарегистрировано хоть одно такое наблюдение), но алгоритм продолжает выполнение.
3. Если большинство наблюдений находится внутри интервала дат 80 % AMP, то производится попытка раздельного выражения тренда начала лета (от начала интервала 80 % AMP до даты MAX) и конца лета (от даты MAX до конца интервала 80 % AMP) с помощью линейных трендов.
4. Если получается выразить оба эти тренда, то отбраковывается тот из них, который делает прогноз, отличающийся от MAX более чем на 10 %. При неудаче с отбраковкой берётся тот тренд, который прогнозирует значение, наименее отличающееся от MAX.
5. Полученное значение ${}^{80}M$ сравнивается с ${}^{90}M$, если таковое, конечно, удалось найти. Для дальнейшего использования берётся большее из них, и алгоритм заканчивается.

6. В том случае, когда лишь меньшая или никакая часть данных попадает в пределы интервала дат 80 % AMP, в качестве прогнозируемого используется ранее определённое значение M_F . Алгоритм заканчивается.
7. Если не удаётся воспользоваться ни одним из вариантов, то данный сезон остаётся без оценки значения NDVI.

Ключевыми особенностями методики являются следующие моменты:

1. Вместо того чтобы искать просто одно, самое близкое к пику вегетационного периода наблюдение, осуществляется попытка устранить возможные помехи и погодные эксцессы с помощью соответствующего анализа большей или меньшей группы других соседних наблюдений.
2. Проводится последовательное прохождение через три уровня анализа — от более узкой базы прогноза к более широкой — в том случае, если предыдущий уровень не увенчался успехом: а) усреднение наблюдений середины лета; б) раздельное выражение трендов начала и конца лета; в) построение тренда за весь вегетационный период.
3. В соответствии с рекомендациями (Eklundh, Jönsson, 2017), если получается оценить значение NDVI на пике сезона разными способами, то берётся большее из них.
4. Постоянно учитывается среднесезонный тренд, слишком отдалённые от него оценки отбраковываются.

Примеры работы описанного алгоритма для разных характерных случаев приведены на рис. 5–8. Здесь кружки показывают значения NDVI сделанных наблюдений для отмеченной площадки и года, а линия (если есть) — построенный прогнозный тренд.

Описанный алгоритм реализован в виде компьютерной программы, которая не только даёт оценку значения NDVI на пике сезона, но и позволяет представить результат в наглядном графическом виде.

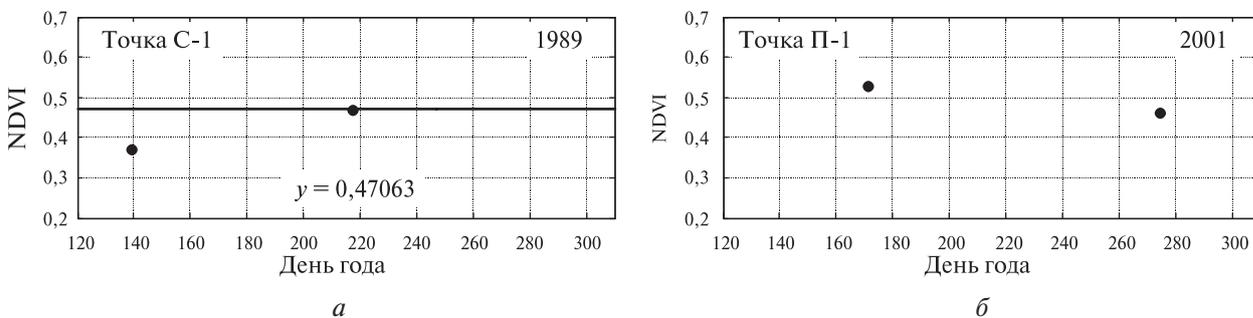


Рис. 5. Пример годового набора данных с двумя наблюдениями: а — одно произошло в середине лета, другое — весной; б — одно произошло весной, другое — осенью (нет прогноза)

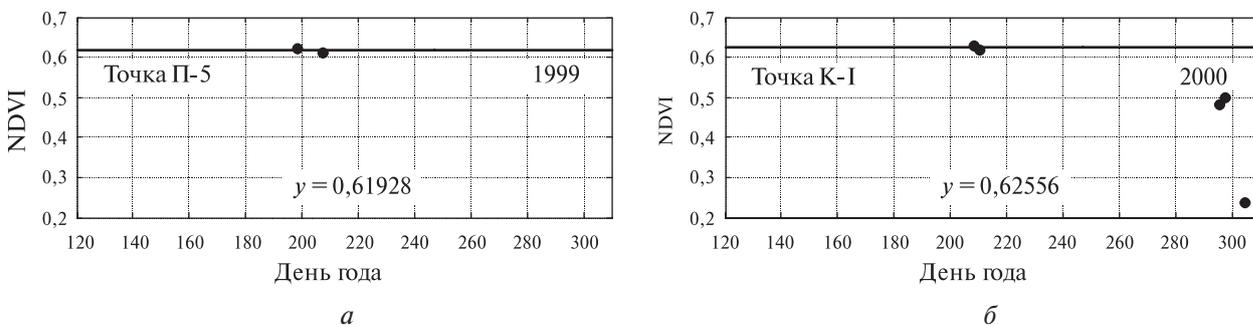


Рис. 6. Пример годового набора данных с двумя наблюдениями, произошедшими в середине лета, когда прогноз строится по их осреднению: а — других наблюдений нет; б — есть другие наблюдения, но они произошли осенью и поэтому проигнорированы

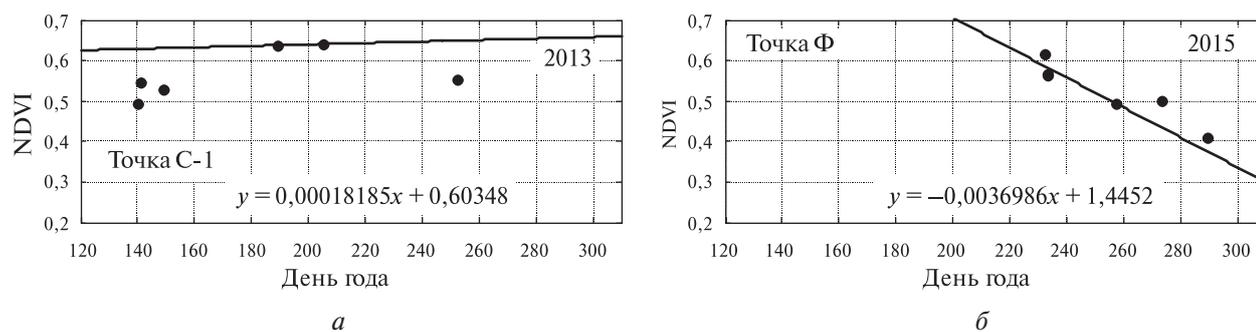


Рис. 7. Пример годового набора данных с построением прогноза на основании линейного тренда наблюдений в начале (а) и конце (б) лета

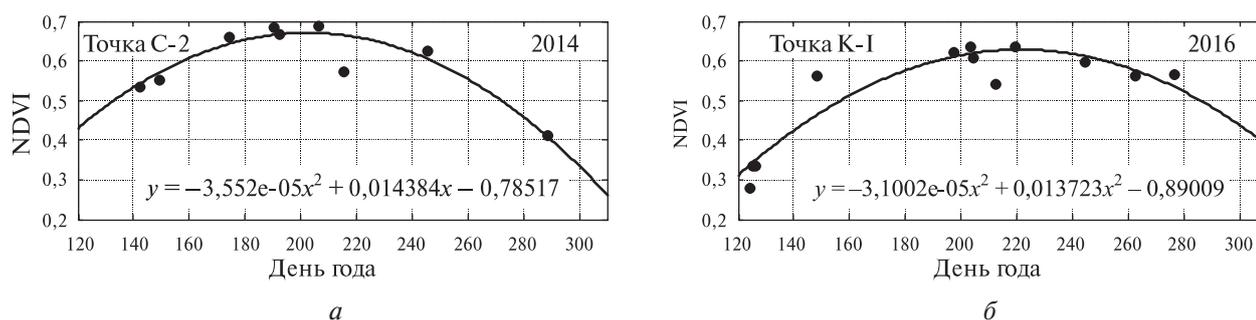


Рис. 8. Примеры годового набора данных с многочисленными наблюдениями, которые хорошо аппроксимируются параболическим трендом

Результаты

После выполнения приведённого выше алгоритма для каждого года получается набор значений для тех мониторинговых точек, которым удалось подобрать подходящие данные. В том случае, когда наблюдений за год было мало (1985, 1987, 1990, 2008, 2010 и 2012 гг.), многие или даже все мониторинговые площадки не нашли своей оценки величины NDVI для пика сезона. Однако для большинства других годов ситуация более представительная (рис. 9).

Можно видеть, что наблюдается заметная дифференциация мониторинговых точек, демонстрирующая как азимутальную анизотропию, так и зависимость от расстояния до КоАЭС.

Например, для стационарных точек (С-1 и С-2) и пар точек «пробная – контрольная» (П-1 – К-1), (П-2 – К-2) и (П-3 – К-3) практически во все годы более удалённые от станции площадки демонстрируют более высокие значения NDVI. Величины среднего различия значений в парах – около 5%. Пара (П-4 – К-4) имеет обратное поведение – чаще всего значения NDVI пробных точек выше, чем контрольных. График фоновой площадки, как правило, также проходит ниже многих.

В то же время пара площадок (П-2 – К-2) практически не показывает каких-либо заметных различий друг между другом до 2007 г. Однако позже их графики всё же расходятся и значения NDVI на площадке К-2 становятся выше, чем на П-2.

У всех построенных графиков наблюдается общая тенденция к росту со временем. Точнее будет сказать, что к 2000 г. начался новый этап в развитии изучаемой территории, когда графики точек скачкообразно (почти в каждом случае) поднялись на 1–1,5 единиц NDVI. Эта тенденция нарушается у большинства точек отчётливо видимыми локальными максимумами и минимумами. Отмеченные особенности в некоторых случаях сменяют друг друга синхронно на разных площадках (например, площадки С-1, С-2, П-1, П-2, П-3, К-2 и К-4 после 2007 г.).

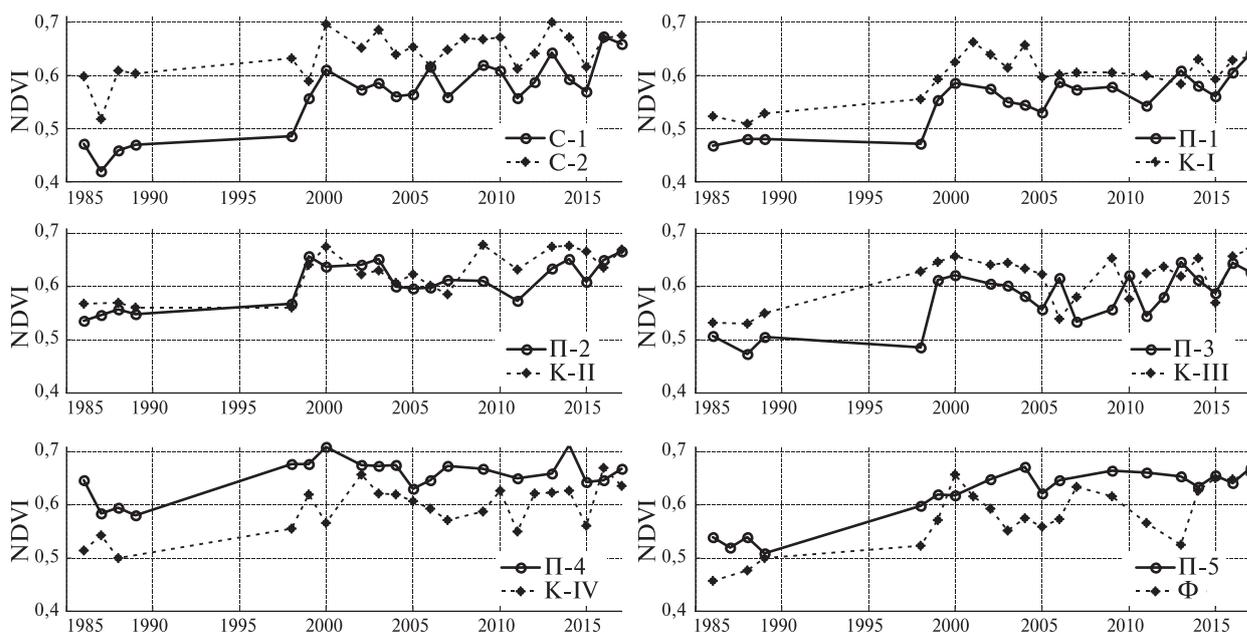


Рис. 9. Результаты оценки значения NDVI для пика сезона по мониторинговым площадкам в течение всего периода наблюдения

Особенно хотелось бы отметить 2016 и 2017 гг. Несмотря на то что 2016 г. показал индивидуальный рекорд только на двух мониторинговых площадках (С-1 и К-IV), в среднем по всем точкам было достигнуто самое высокое значение NDVI за всю предшествующую историю наблюдений. 2017 г. продолжил эту тенденцию и вслед предыдущему продемонстрировал рекордные значения на площадках П-1, П-2, П-5, К-III и Ф.

Станционные площадки явно выделяются среди остальных по трендам NDVI:

1. Скорее всего, тепловое «загрязнение» атмосферы атомной станцией формирует более высокую продуктивность фитоценозов в непосредственной близости от неё.
2. При таком небольшом расстоянии от КоАЭС даже разница 2 км между площадками С-1 и С-2 даёт существенный прирост продуктивности на площадке С-2 как следствие уменьшения вредного воздействия.
3. Тренды С-1 и С-2 практически всегда сохраняют стабильную разницу между собой, что свидетельствует о неизменной интенсивности воздействия КоАЭС на экосистему за весь период исследования.

Интересно посмотреть, как выглядит при этом сеть мониторинга в пике сезона каждого года. Были построены полярные диаграммы с использованием азимутальных групп точек, представленных в табл. 4. Фактически, в силу особенностей топографии, мониторинговые площадки этих групп не лежат на одном луче с соответствующим азимутом, но в пределах угла створа — точно. Не всегда удавалось построить полную систему, пропуски вызваны причинами, описанными ранее. Результат показан на рис. 10 (см. с. 96).

Таблица 4. Группирование мониторинговых точек по азимутам полярной системы координат с центром в расположении КоАЭС

Группа	Площадки	Азимут, град	Створ, град
1	С-1, С-2, П-1, К-I, Ф	315	±30
2	П-2, К-II	10	±30
3	П-3, К-III	100	±30
4	П-4, К-IV	195	+15...-30
5	П-5	225	+30...-15

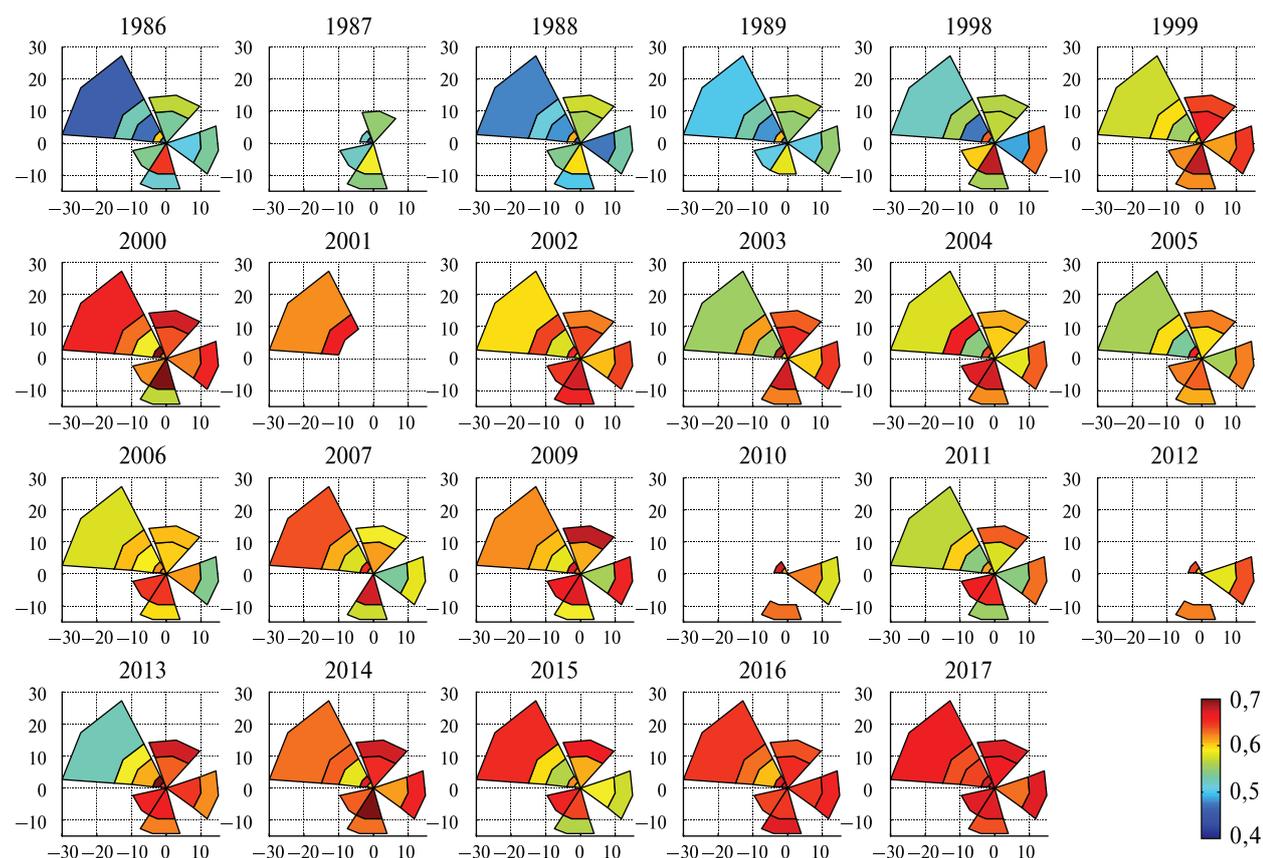


Рис. 10. Полярные диаграммы значений NDVI по сети мониторинга за все годы, по которым удалось оценить значение для пика сезона. Подписи по осям — расстояние от АЭС в километрах. Цветовая шкала — значения NDVI

По системе полярных диаграмм сети мониторинга можно видеть рост значений с годами. Это проявляется в преобладании синих оттенков с 1986 до 1998 г. и красных — в последние два года. При сопоставлении значений отдельных пробных и контрольных точек между собой не наблюдается заметной радиальной корреляции.

Получившаяся пёстрая картина мониторинговой системы в целом за весь период наблюдений указывает на то, что нет отдельного выделенного направления относительно КоАЭС, в котором экосистема испытывала бы год от года угнетающее воздействие. Данный факт подтверждается результатами исследований древесных фитоценозов в районе расположения КоАЭС. На основании действующих «Правил санитарной безопасности в лесах» (Правила..., 2013) жизненное состояние древостоя в ЗН КоАЭС за большинство рассматриваемых лет в целом можно охарактеризовать как «здоровое (без признаков ослабления)» и отнести к I категории по шкале состояния деревьев. Для таких древостоев характерна, как правило, густая крона, хвоя/листья зелёного цвета, прирост текущего года нормального размера.

Однако в период 1986–1999 гг. такие аномальные направления выделить можно. Это группы 1 (в ближней зоне) и 3, т. е. северо-западное и восточное направления. Для них характерно более благоприятное состояние фитоценозов при удалении от станции. Вблизи КоАЭС состояние древостоев, согласно (Правила..., 2013), в эти годы могло характеризоваться как «ослабленное» (II категория состояния деревьев): с разреженными кронами деревьев, светло-зелёной хвоей/листьями, уменьшенным приростом (не более чем наполовину) и с отдельными засохшими ветвями. С увеличением расстояния от атомной станции жизненное состояние древостоев приближалось к категории «здоровых (без признаков повреждения)». Интересным исключением является азимутальная система 4 (южное направление), которая в эти годы стабильно демонстрирует обратную зависимость. В последующие годы различия между площадками в пределах отдельных азимутальных групп практически стираются.

Выводы

Достигнутые наработки позволяют сделать следующие выводы:

- Разработан и реализован алгоритм, дающий исследователю инструментарий для работы с неравномерными и нерегулярными (по временной шкале) данными дистанционного зондирования Земли по оценке благополучия растительности.
- Апробирование данного алгоритма впервые проведено для системы стационарных мониторинговых площадок в 30-километровой зоне вокруг КоАЭС.
- Зависимость состояния фитоценозов от расстояния от атомной станции было выявлено для некоторых азимутальных направлений.
- Интенсивность воздействия КоАЭС на растительность во времени меняется, но слабо.
- В данной работе ключевым оценочным параметром был выбран вегетационный индекс NDVI, однако предложенная методика может быть применена и к другим аналогичным индексам.
- Представленная в работе методика мониторинга благополучия фитоценозов по многолетним нерегулярным спутниковым данным может оказаться полезной при изучении растительных сообществ в различных экологических условиях.

Литература

1. Аврорин Н. А., Качурин М. Х., Коровкин А. А. Материалы по растительности Хибинских гор // Материалы по растительности центральной и западной частей Кольского полуострова: Труды совета по изучению производительных сил. Сер. Кольская. Вып. 11. М.: Изд-во АН СССР, 1936. С. 19–90.
2. Алисов Б. П., Берлин И. А., Михель В. М. Курс климатологии. Ч. 3. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 320 с.
3. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2014 году / Министерство природных ресурсов и экологии. Мурманск, 2015. 177 с.
4. Кизеев А. Н., Карначев И. П., Жиров В. К., Загвоздина О. И., Никанов А. Н. Вопросы экологической безопасности на предприятиях промышленного комплекса Кольского Заполярья // Медицина труда и промышленная экология. 2010. № 4. С. 28–31.
5. Нешатаев В. Ю., Нешатаева В. Ю. Синтаксономическое разнообразие сосновых лесов Лапландского заповедника // Ботанический журн. 2002. Т. 87. № 1. С. 99–106.
6. Правила санитарной безопасности в лесах. Приказ Минприроды России № 613 от 24.12.2013. 18 с.
7. Пузаченко М. Ю., Черненко Т. В. Определение факторов пространственного варьирования растительного покрова с использованием ДДЗ, ЦМР и полевых данных на примере центральной части Мурманской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 167–191.
8. Самбук Ф. В. Печорские леса // Труды ботанического музея АН СССР. 1932. Т. 24. С. 63–250.
9. Справочник по климату СССР. Вып. 2. Мурманская область. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 144 с.
10. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2013. 592 с.
11. Яковлев Б. А. Климат Мурманской области. Мурманск: Мурманское книжное издательство, 1961. 200 с.
12. Bhandari S. P. Monitoring forest dynamics using time series of satellite image data in Queensland, Australia: PhD thesis. Australia, University of Queensland, 2011. 155 p.
13. Eklundh L., Jönsson P. TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing: Software Manual. Malmö: Lund University, 2017. 92 p.
14. Greenberg J. S., Hertzfeld H. Space economics // Progress in astronautics and aeronautics. V. 144. Washington, DC: American Inst. of Aeronautics and Astronautics, 1992. 437 p.
15. Jeganathan C., Dash J., Atkinson P. M. Remotely sensed trends in the phenology of northern high latitude terrestrial vegetation, controlling for land cover change and vegetation type // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 143. No. 3. P. 154–170.
16. Jeong S.-J., Schimel D., Frankenberg C., Drewry D. T., Fisher J. B., Verma M., Berry J. A., Lee J.-E., Joiner J. Application of satellite solar-induced chlorophyll fluorescence to understanding large-scale

- variations in vegetation phenology and function over northern high latitude forests // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 190. No. 3. P. 178–187.
17. Jia G. J., Epstein H. E., Walker D. A. Greening of arctic Alaska, 1981–2001 // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. Iss. 20. P. 3-1–3-4.
 18. Myneni R. B., Keeling C. D., Tucker C. J., Asrar G., Nemanill R. R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 // *Nature*. 1997. V. 386. No. 4. P. 698–702.
 19. Olthof I., Pouliot D., Latifovic R., Chen W. Vegetation-Specific NDVI Trends in Northern Canada from Satellite Data // *Arctic*. 2008. V. 61. No. 4. P. 381–394.
 20. Parent M. B., Verbyla D. The Browning of Alaska's Boreal Forest // *Remote Sensing*. 2010. No. 2(12). P. 2729–2747.
 21. Reed B. C., Brown J. F., VanderZee D., Loveland Th. R., Merchant J. W., Ohlen D. O. Measuring phenological variability from satellite imagery // *J. Vegetation Science*. 1994. V. 5. No. 5. P. 703–714.

Experience of long-term monitoring of phytocenosis condition using temporary irregular remote sensing data in zones of increased radiation hazard

K. Yu. Silkin¹, A. N. Kizyev²

¹ *Voronezh State University, Voronezh 394018, Russia*
E-mail: const.silkin@mail.ru

² *N. A. Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of Kola Science Centre RAS, Apatity 184209, Russia*
E-mail: aleksei.kizeev@mail.ru

The technique of condition assessment of phytocenosis on the basis of irregular long-term data of remote sensing of Earth is developed and approved. Remote studying of boreal landscapes faces a persistent problem of exclusive rarity of absolutely cloudless days. During continuous annual study of medium-sized, but numerous objects located in a certain area, it often occurs that not all the objects are visible at the same time among clouds during the next overflight of the satellite. Although such satellite as Landsat overfly every location on the globe approximately twice a month, the observations of each object are rather irregular. That is why very scarce data obtained at different times of the vegetation period are available for a long-term monitoring. Such observations are very difficult for direct comparison. The proposed technique was developed for the solution of this problem. Its essence is assessing the key parameters at the peak of a vegetative season use the scarce and irregular values obtained. In this work, the NDVI index was chosen key parameter, however, the offered technique can be applied also to other similar indexes. The test of this technique was for the first time performed by an example of the stationary monitoring sites system represented by bilberry pine forests. This system was developed within a 30-km zone around the Kola nuclear power plant which is a potentially dangerous object of nuclear power on the territory of the European Arctic. The received results allowed to draw conclusions on spatial and temporary influence of the nuclear power station on the condition of the environment.

Keywords: Kola nuclear power plant, phytocenosis, remote sensing, NDVI index, monitoring, algorithm

Accepted: 19.02.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-84-99

References

1. Avrorin N.A., Kachurin M. Kh., Korovkin A.A., *Materialy po rastitelnosti Khibinskikh gor (Materials on vegetation of Khibiny Mountains), Materialy po rastitelnosti tsentralnoy i zapadnoy chastey Kolskogo poluostrova. Trudy soveta po izucheniyu proizvoditelnykh sil. Seriya Kolskaya (Materials on vegetation of*

- the central and western Kola Peninsula. Advances of the Council on the study of productive forces. Ser. Kolskaya), Issue 11, Moscow: Izd. AN SSSR, 1936, pp. 19–90.
2. Alisov B. P., Berlin I. A., Mikhel V. M., *Kurs klimatologii. Ch. III* (Climatology study. Vol. III), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1954, 320 p.
 3. *Doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Murmanskoy oblasti v 2014 godu* (The report on state and environmental protection of Murmansk region in 2014), Murmansk, 2015, 177 p.
 4. Kizyeyev A. N., Karnachev I. P., Zhiron V. K., Zagvozdina O. I., Nikanov A. N., Voprosy ekologicheskoy bezopasnosti na predpriyatiyakh promyshlennogo kompleksa Kolskogo Zapolyaria (Questions of ecological safety at the enterprises of industrial branch of the Kola Polar region), *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2010, No. 4, pp. 28–31.
 5. Neshatayev V. Yu., Neshatayeva V. Yu., Sintaksonomicheskoye raznoobrazie osnovnykh lesov Laplandskogo zapovednika (Sintaxonomical variety of the pine forests of Lapland Biosphere Reserve), *Botanicheskiy zhurnal*, 2002, Vol. 87, No. 1, pp. 99–106.
 6. *Minprirody of Russia: Order No. 613*, Date 24.12.2013, 18 p.
 7. Puzachenko M. Yu., Chernenkova T. V., Opredeleniye faktorov prostranstvennogo varirovaniya rastitelno-go pokrova s ispolzovaniyem DDZ, TsMR i polevykh dannykh na primere tsentralnoy chasti Murmanskoy oblasti (Definition of a vegetable cover factors of a spatial variation with use of remote sensing, relief digital model and field data on the example of the central part of Murmansk region), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 167–191.
 8. Sambuk F. V., Pechorskiye lesa (Pechora forests), *Trudy botanicheskogo muzeya AN SSSR* (Advances of Botanical Museum AN SSSR), 1932, Vol. 24, pp. 63–250.
 9. *Spravochnik po klimatu SSSR. Vyp. 2, Murmanskaya oblast'. Ch. II. Temperatura vozdukha i pochvy* (Reference book on climate of the USSR. Issue 2, Murmansk region, Vol. II. Temperature of air and ground), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965, 144 p.
 10. Shovengerdt R. A., *Distantsionnoye zondirovaniye. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy* (Remote sensing. Models and methods of images processing), Moscow: Tekhnosfera, 2013, 592 p.
 11. Yakovlev B. A., *Klimat Murmanskoy oblasti* (Climate of Murmansk region), Murmansk: Murmanskoye knizhnoye izdatelstvo, 1961, 200 p.
 12. Bhandari S. P., *Monitoring forest dynamics using time series of satellite image data in Queensland, Australia*, PhD thesis, University of Queensland, Australia, 2011, 155 p.
 13. Eklundh L., Jönsson P., *TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing*, Software Manual, Lund, Malmö, 2017, 92 p.
 14. Greenberg J. S., Hertzfeld H., Space economics, *Progress in astronautics and aeronautics*, Vol. 144, Washington, DC: American Inst. of Aeronautics and Astronautics, 1992, 437 p.
 15. Jeganathan C., Dash J., Atkinson P. M., Remotely sensed trends in the phenology of northern high latitude terrestrial vegetation, controlling for land cover change and vegetation type, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 143, No. 3, pp. 154–170.
 16. Jeong S.-J., Schimel D., Frankenberg C., Drewry D. T., Fisher J. B., Verma M., Berry J. A., Lee J.-E., Joiner J., Application of satellite solar-induced chlorophyll fluorescence to understanding large-scale variations in vegetation phenology and function over northern high latitude forests, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 190, No. 3, pp. 178–187.
 17. Jia G. J., Epstein H. E., Walker D. A., Greening of arctic Alaska, 1981–2001, *Geophysical Research Letters*, 2003, Vol. 30, Issue 20, pp. 3-1–3-4.
 18. Myneni R. B., Keeling C. D., Tucker C. J., Asrar G., Nemanill R. R., Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991, *Nature*, 1997, Vol. 386, No. 4, pp. 698–702.
 19. Olthof I., Pouliot D., Latifovic R., Chen W., Vegetation-Specific NDVI Trends in Northern Canada from Satellite Data, *Arctic*, 2008, Vol. 61, No. 4, pp. 381–394.
 20. Parent M. B., Verbyla D., The Browning of Alaska's Boreal Forest, *Remote Sensing*, 2010, No. 2(12), pp. 2729–2747.
 21. Reed B. C., Brown J. F., VanderZee D., Loveland Th. R., Merchant J. W., Ohlen D. O., Measuring phenological variability from satellite imagery, *J. Vegetation Science*, 1994, Vol. 5, No. 5, pp. 703–714.