

*В.Ю. Цепелев, Е.А. Паниди, Н.В. Торлопова, А.А. Бобков*

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА  
ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИХ  
ИЗМЕНЕНИЙ XXI В.**

*V. Tsepelev, E. Panidi, N. Torloпова, A. Bobkov*

**USING OF VEGETATION COVER CHARACTERISTICS  
FOR MONITORING OF XX CENTURY CLIMATE CHANGING**

*Исследование посвящено изучению связей между климатическими изменениями, происходившими в начале XXI в., и изменениям характеристик растительного покрова в таежной зоне. В работе проведено изучение поведения вегетационного индекса NDVI для территорий, занятых различными типами растительного покрова в районе тестового полигона, который расположен возле г. Сыктывкар, где ведутся многолетние наблюдения за характеристиками растительного покрова и осадков.*

*Ключевые слова: климат, вегетационный индекс, индикатор климата, зона тайги.*

*This research dedicated to investigate the relations between the XXI century climate changes and vegetation characteristics variability of taiga zone. For this purpose, we studied the behavior of vegetation index (NDVI) for the areas occupied by different types of vegetation in the ground test area located nearby Syktyvkar city (Komi Republic, Russia), which conducted long-term observations of vegetation characteristics and precipitation.*

*Key words: climate, vegetation index, climate indicator, taiga zone.*

***Введение***

Климатические изменения, наблюдавшиеся в Северном полушарии на протяжении всего двадцатого века в последние годы ускорились и начали оказывать влияние на экосистемы арктических и субарктических районов [9, 13]. В настоящее время методы дистанционного зондирования Земли позволяют проводить оперативный мониторинг динамики ледового покрова Северного Ледовитого океана и, как следствие, мониторинг климатических изменений. Но на материковой части российской Арктической зоны за последние 30 лет плотность наблюдательной сети только уменьшалась, а инструментария, позволяющего дистанционно изучать климатические изменения пока не существует. Поэтому изучение динамики климата, в слабо освещенных гидрометеорологических наблюдениями материковых районах, ведется фрагментарно. Тем не менее, у ученых имеется в распоряжении длительный ряд спутниковых наблюдений за растительным покровом субарктических регионов, который можно использовать для изучения динамики климата. Использование данных дистанционного зондирования, а в частности данных вегетационного индекса (*NDVI*), позволяет изучать изменения растительного покрова арктических и субарктических регионов [6, 8, 11]. Исследования показали, что изменение ареалов кустарничковых типов растительного покрова

тундры и лесотундры Сибири и Канадской Арктики, имеет положительную корреляционную связь с летней температурой воздуха этих регионов [7, 8, 12, 13]. Следовательно, динамика растительного покрова тундры и лесотундры может являться индикатором влияния климата на наземные экосистемы [6, 10].

Остается открытым вопрос о том, какие именно параметры растительного покрова и его типы можно использовать как индикатор климатических изменений в других климатических зонах субарктики. В настоящем исследовании нами была поставлена задача выявления таких индикаторов и уточнение, с их помощью, масштаба климатических изменений, которые произошли в материковой части субарктической зоны РФ.

### *Методические основы исследования*

На первом этапе исследования связей между изменением характеристик растительного покрова и динамикой климата, нам необходимо было определить те типы растительного покрова, которые могут с наибольшей степенью достоверности служить климатическими индикаторами. Исследование необходимо было провести в пределах небольшого географического района, в котором существуют длительные наземные наблюдения за растительным покровом и климатом.

Для анализа состояния растительного покрова и выявления климатических индикаторов нами был использован вегетационный индекс (*NDVI*). Этот индекс является одним из наиболее часто используемых, при проведении количественной оценки состояния растительного покрова. Вычисляется *NDVI* по следующей формуле [5]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где *NIR* — отражение в ближней инфракрасной области спектра; *RED* — отражение в красной области спектра.

Для вычисления *NDVI* используются две области спектра, в одной из которых (красная область) происходит максимальное поглощение солнечной радиации хлорофиллом, а в другой (ближняя инфракрасная) — происходит максимальное отражение солнечной радиации от листвы растений. Здоровый растительный покров, обладающий густой листвой имеет высокую поглощающую способность в красной области и высокую отражательную способность в ближней инфракрасной области спектра. Использование нормализованной разности между минимумом и максимумом отражательной способности позволяет отделять и классифицировать растительные объекты от прочих природных объектов. Природные объекты, не связанные с растительностью, имеют фиксированное значение *NDVI*.

Анализ индекса позволяет нам оценить количество фотосинтетически активной биомассы. Существует устойчивая корреляция между показателем *NDVI* и продуктивностью для различных типов экосистем. Будучи искусственным безразмерным показателем *NDVI* может показывать значительную корреляцию с продуктивностью и биомассой растительного покрова, то есть чем больше зеленая фитомасса, тем выше значение индекса [5]. При этом значения *NDVI* могут изменяться от «-1» до «+1».

В настоящее время на околоземной орбите находится несколько различных искусственных спутников Земли, по данным измерений которых рассчитывается вегетационный индекс. Для выбора источника данных, подходящего для наших исследований, нами были выдвинуты три основных требования:

- А. Пространственное разрешение данных должно позволить нам выделить переходные типы растительных сообществ. Требование связано с тем, что при анализе растительного покрова нас интересуют области, переходные между ландшафтными зонами. Изменения в областях с гомогенным растительным покровом могут происходить на временном масштабе в сотни лет, тогда как в переходных областях, с гетерогенным растительным покровом, изменения можно зафиксировать и на десятилетнем временном масштабе [7, 8].
- Б. Ряды наблюдений должны быть непрерывны и однородны и обладать малой дискретностью во времени. Это требование выдвинуто в первую очередь в связи с высокой временной изменчивостью индекса вегетации в зависимости от погодных условий района. Внутригодовые изменения в увлажнении или температурном режиме исследуемого района приводят к немедленному отклику в вегетационных характеристиках растительного покрова. Второй проблемой является тот факт, что умеренные и высокие широты Евразии характеризуются постоянным наличием облачного покрова. Вероятность того, что при космической съемке выбранного географического района, облачность будет отсутствовать крайне мала. Вследствие этого ряд наблюдений за растительным покровом может содержать большое количество пропусков, что несомненно приведет к ошибкам в расчете многолетних трендов. Поэтому, чем чаще будут проводиться измерения вегетационного индекса в одном и том же районе, тем меньшее количество пропусков будет содержать ряд наблюдений.
- В. Длина ряда данных наблюдений должна составлять не менее 10 лет. На более коротком временном интервале мы можем не заметить изменений, которые происходят в структуре растительного покрова.

По своему пространственному разрешению оптимальным источником данных могли бы служить значения индекса вегетации, которые могут быть получены со спутников серии «Landsat». Но наблюдения одного и того же района со спутника «Landsat» могут проводиться с периодичностью не чаще чем раз в несколько недель, а с учетом высокой вероятности закрытия земной поверхности облачным покровом и еще реже. Поэтому, непрерывный мониторинг по данным «Landsat» практически невозможен. Исследования динамики растительного покрова, которые проводились в работе Василевич и др. [1] показывают, что для небольшого тестового полигона за весь теплый сезон года можно получить всего несколько снимков со спутника «Landsat». При этом снимки могут быть отнесены как к периодам высокого, так и к периодам низкого увлажнения, к аномально теплым или аномально холодным периодам. Погодные условия в момент наблюдения могут существенно отклонять значения индекса от его среднего, за вегетационный сезон, состояния. Следовательно, по снимкам, полученным для различных условий вегетации невозможно корректно рассчитать многолетний тренд *NDVI*. В связи с тем, что многолетние тренды индексов малы по своей абсолютной

величине и рассчитаны на основе дискретного ряда данных случайным образом зафиксированных как в сухие, так и влажные (теплые/холодные) периоды, то корреляцию между трендом *NDVI* и климатическими трендами нельзя считать достоверной.

Поскольку при изучении климатических изменений нас интересует непрерывная динамика индекса вегетации, то нами был сделан выбор в пользу снимков, полученных со спутника «TERRA» (радиометр «MODIS») с пространственным разрешением 250 метров на пиксель. Такое пространственное разрешение на порядок меньше того, которое можно получить при наблюдениях со спутников серии «Landsat». Решающее преимущество данных, полученных со спутника «TERRA», заключается в непрерывности их получения. Данные «MODIS» ежедневно покрывают исследуемую нами географическую область, а индекс вегетации полученный в результате этой съемки, усредняется за 16-суточный интервал. Таким образом, вероятность того, что съемка растительного покрова будет произведена в безоблачную погоду, резко возрастает, а в результате генерируется непрерывный ряд наблюдений. Последнее позволяет нам корректно изучать пространственно-временные связи *NDVI* с непрерывно изменяющимися гидрометеорологическими параметрами.

На значения индекса вегетации влияет также видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция и угол наклона поверхности [5]. Для корректной интерпретации долговременных трендов *NDVI* нами была проведена работа по исследованию взаимосвязей между индексом вегетации и различным типами растительного покрова. С этой целью был использован тестовый полигон, расположенный в зоне средней тайги Республики Коми, на котором проводятся регулярные наземные исследования растительного покрова (рис. 1). Выбор полигона был обусловлен его репрезентативностью.

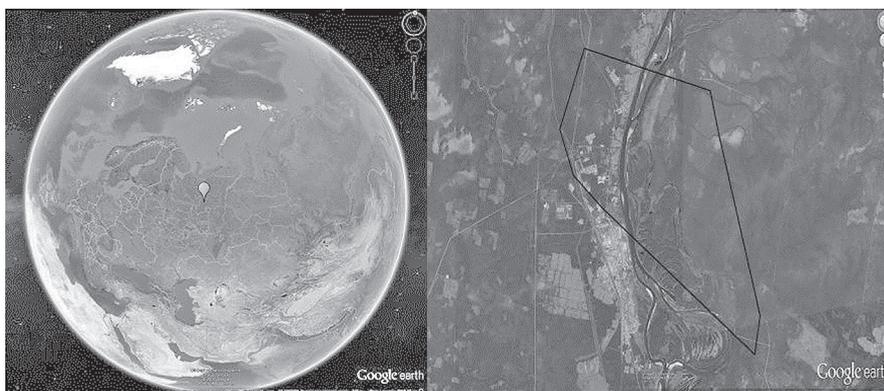


Рис. 1. Местоположение наземного тестового полигона

На материале рядов данных, полученных для выбранного полигона за период с 2000 по 2013 г., нами была изучена многолетняя изменчивость температуры воздуха и осадков, определены их многолетние тренды, выявлены годы с экстремальными сочетаниями температурно-влажностного режима и влияние этих сочетаний на поведение индекса вегетации для разных типов растительного покрова.

## *Использованные данные*

### **1. Данные спутникового, дистанционного зондирования (*NDVI*)**

Пространственное распределение *NDVI* определялось по данным съёмки «TERRA/MODIS». Данные зондирования распространяются свободно [14] в форме растровых покрытий с пространственным разрешением ~5 км, ~1 км и ~250 м на пиксель, с осреднением помесечно или за 16 дней. В работе было изучено изменение *NDVI* за период 2000–2013 гг. в связи с изменениями температуры и осадков на протяжении вегетационного периода.

### **2. Гидрометеорологические данные**

Для исследования изменений гидрометеорологических характеристик тестового полигона нами были привлечены данные наблюдений за период 2000–2013 гг., по станции «Сыктывкар», относящейся к наблюдательной сети Росгидромета. Нами были привлечены среднесуточные данные температуры воздуха на высоте 2 м и суточные суммы осадков. Поскольку данные по индексам вегетации (*NDVI*) представлены по 16-дневным периодам, то для приведения к единому представлению были рассчитаны средние температуры воздуха и суммы осадков по тем же самым 16-дневным периодам.

По гидрометеорологическим данным нами были рассчитаны их вторичные наборы, а именно:

- средние температуры воздуха по вегетационным сезонам;
- накопленные суммы температур воздуха по вегетационным сезонам;
- средние суммы осадков по вегетационным сезонам;
- накопленные суммы осадков по вегетационным сезонам.

### **3. Характеристика тестового полигона**

Район исследования расположен в таежной растительной зоне на европейском северо-западе (РФ, Республика Коми, Сыктывдинский район). Тестовый полигон охватывает территории Сыктывкарского лесничества и леса, находящиеся в ведении СЛПК и сельскохозяйственных предприятий. Также в пределах полигона находится город Сыктывкар с прилегающими дачными участками, зеленой зоной, р. Вычегда с водоохранной зоной (рис. 1, рис. 8а).

Лесистая часть полигона располагается на территории Сыктывкарского лесничества. Лесопокрытая площадь Сыктывкарского лесничества занимает ~92 %. В лесном покрове преобладают хвойные породы (~77 %), в том числе сосняки (~42 %) и ельники (~35 %) покрытой лесом площади. Значительные площади (~38 %) заняты сосново-лиственными и лиственно-еловыми молодняками, спелые и перестойные древостои (~55 %) представлены, главным образом, ельниками [2, 3].

## *Методы исследований*

### **Определение вегетационных сезонов**

Исследование климатических изменений, которые проявляются в изменениях характеристик растительного покрова, было предложено проводить для однородных

вегетационных периодов. В изучаемой части субарктического региона существуют два типа растительности — вечнозеленая и листопадная. Если для вечнозеленого растительного покрова цвет листвы остается практически постоянным в течение года, то для листопадной он изменяется от светло-зеленого в весенний период до желтого в осенний. Таким образом, для изучения динамики растительного покрова при помощи индексов вегетации необходимо предварительно выделить начало и конец вегетационных периодов, внутри которых цвет листопадной растительности меняется незначительно.

Началом периода вегетации считается переход среднесуточной температуры воздуха через  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  на повышение, а окончание через  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  на понижение [4]. Нас интересует тот момент, когда цвет растительного покрова начинает качественно изменяться, то есть когда весной усиливается оттенок зеленого, а осенью начинает появляться желтый оттенок. Изменение цвета происходит ближе к дате перехода среднесуточной температуры воздуха через  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (период активной вегетации). Именно тогда качественно меняется цвет растительности — весной происходит смена цвета на более зеленый, а в конце лета листья начинают желтеть.

На основе климатической базы данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации были рассчитаны периоды времени, в которые предположительно происходят значимые изменения индекса вегетации: это переход через  $+5$  и  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  весной и переход через  $+5$  и  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  на убывание среднесуточной температуры осенью. Даты начала и конца периодов получены как средние за период 2000–2013 гг. Следует отметить, что даже за такой короткий период времени (14 лет), интересующие нас климатические характеристики (переход среднесуточной температуры воздуха через  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) весьма различались по годам. Так, даты перехода через  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  варьировали от 6 мая до 24 июня весной и от 3 августа до 11 сентября осенью. Период между датами перехода температуры через значения  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  составлял от 59 до 126 дней.

В дальнейшем исследовании границы выделенных периодов использовались для разбиения и осреднения по вегетационным сезонам (весна, лето, осень) непрерывных рядов гидрометеорологических данных и индексов вегетации с целью проведения статистических исследований (табл. 1).

*Таблица 1***Даты начала и окончания вегетационных сезонов осредненные за период 2000–2013 гг.**

Сезон	Начало	Окончание	Продолжительность
Весна	13 мая	3 июня	22
Лето	04 июня	21 августа	78
Осень	22 августа	29 сентября	39

### **Визуализация данных и сравнительный анализ**

Для обработки исходных данных и картографической визуализации распределения значений индекса вегетации и климатических параметров нами были использованы программные средства ArcGIS и ArcReader. ArcGIS является полнофункциональной

универсальной настольной ГИС-оболочкой. ArcReader (рис. 2) — свободно распространяемый программный продукт, средство просмотра данных, подготовленных в ArcGIS. Таким образом, была отделена рабочая среда, используемая при подготовке данных от среды визуализации данных, используемой для их изучения и сравнения данных. Подобный подход позволил скрыть инструментарий ГИС-специалистов от инструментария специалистов-предметников, создав для последних комфортное рабочее пространство, понятное интуитивно и не перегруженное лишними инструментами. Необходимость подобного подхода к организации работы была вызвана тем, что коллектив состоял из специалистов в различных предметных областях, использующих в работе различные программные средства. В то же время перед нами стояла задача обеспечить «единую картинку» для всех участников исследования, дав возможность всем участникам делать согласованные выводы.

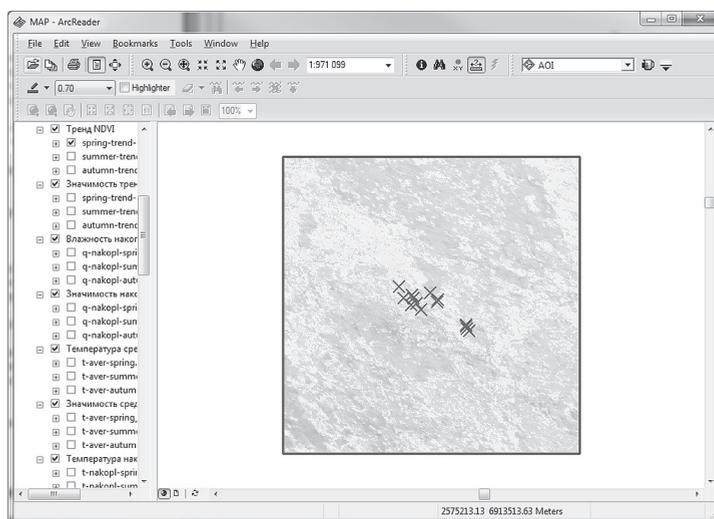


Рис. 2. Тренды *NDVI* для территории полигона за период 2000–2013 гг., представленные в оболочке ArcReader

### *Исследование климатических трендов*

#### **Температура воздуха и суммы осадков за 16-дневные периоды**

Температура воздуха и суточные суммы осадков с 2000 по 2013 г., полученные по наблюдательной гидрометеорологической станции Сыктывкар, изменялись в вегетационный период года в широких пределах (рис. 3). Годами с наиболее высокими температурами были 2000, 2007, 2010 и 2011 г. При этом максимальная температура, осредненная по 16-дневным периодам, наблюдалась летом 2010 г. и составляла 24,3 °С в 14-й 16-дневный период года. Наиболее низкие температуры были отмечены в 2006, 2009 и 2012 г. Минимум по 16-дневным периодам наблюдался в 13-й 16-дневке 2012 г. и составил 17,8 °С.

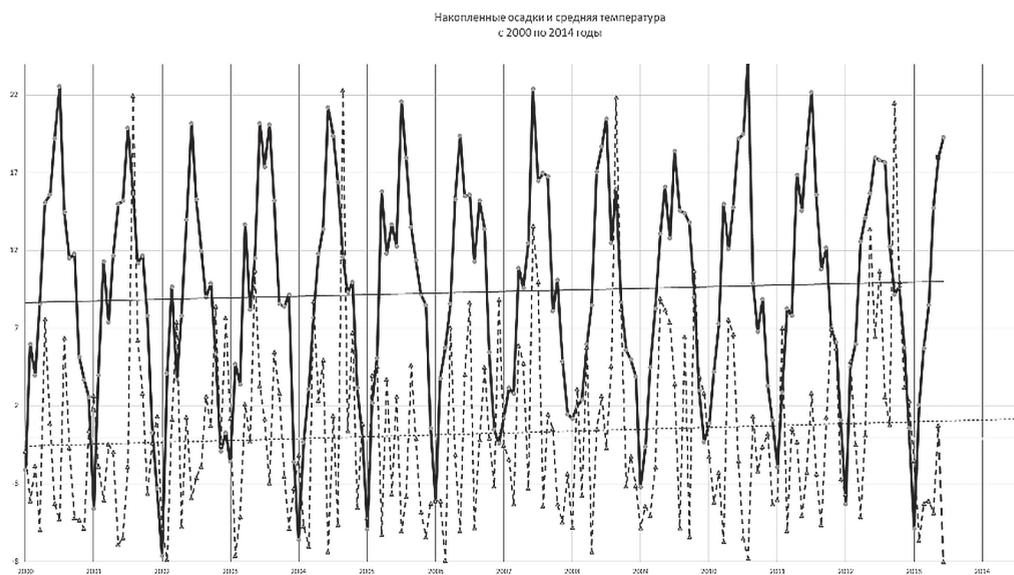


Рис. 3. График 16-суточных сумм осадков и средней за 16 суток температуры воздуха по станции Сыктывкар с 2000 по 2013 г. Сплошная линия — температура, пунктирная линия — накопленные осадки

Наибольшие суммы осадков наблюдались в 2001, 2004, 2008 и 2012 г. Максимальная за этот период 16-дневная сумма осадков наблюдалась в 15-й 16-дневке 2004 г. и составила 113,7 мм. Наиболее сухие периоды наблюдались в 2000, 2005, 2010 и 2011 г. Минимальная за этот период 16-дневная сумма осадков наблюдалась в 15-ой 16-дневке 2005 г. и составила 47,3 мм.

Таким образом, по совокупности наблюдений за температурой воздуха и осадками годами, наиболее ярко выделяющимися сухими и жаркими были 2000, 2010 и 2011 г. Наиболее холодные и влажные периоды наблюдались в 2012 г.

Следует отметить наличие положительного тренда температуры воздуха и осадков в изучаемый период времени. Так тренд 16-дневных средних температуры составляет примерно +1 °С за 14 лет, а тренд 16-суточных сумм осадков примерно +10 мм за 14 лет.

На следующем этапе нами было проведено осреднение гидрометеорологических данных каждого отдельного года по выделенным вегетационным сезонам. Даты начала и окончания сезонов указаны в табл. 1. Средние, по вегетационным сезонам, использовались нами для расчетов линейных трендов температуры воздуха и осадков на станции Сыктывкар и исследуемом полигоне.

### **Температура воздуха по вегетационным сезонам**

Наиболее теплыми годами в летние периоды были 2000, 2003, 2007, 2008 и 2010 г. При этом самым жарким было лето 2010 г. со средней, за летний период, температурой 17,5 °С. Самыми холодными летними периодами были периоды 2001, 2002, 2006 и 2009 г. При этом 2002 г. выделяется на их фоне температурой 14,1 °С (рис. 4).



Рис. 4. График средней по сезонам года температуры воздуха на станции Сыктывкар с 2000 по 2013 г.

Наиболее теплыми годами в весенний период были 2005, 2010 и 2012 г. Самыми теплыми были весны 2005 и 2010 г. со средней температурой 13,8 и 13,6 °C. Самыми холодными веснами были весны 2002 и 2008 г. При этом весной 2002 г. средняя температура составляла 5,8 °C.

Самые теплые осени наблюдались в 2001, 2004, 2005 и 2009 г. Самой теплой была осень 2009 г. со средней температурой 11,4 °C. Самыми холодными были осени 2002, 2008 и 2010 г. Осенью 2008 г. средняя температура составляла 7,2 °C.

По совокупности летних и весенних температур самым теплым годом был 2010 г., а по совокупности летних и осенних температур 2005 г. Самые холодные весна и лето наблюдались в 2002 г., а самые холодные лето и осень в 2008 и 2002 г.

Абсолютным рекордсменом по низким температурам был 2002 г. с рекордно низкими температурами весной, летом и осенью.

Изучение графика хода средней температуры воздуха, отдельно взятой для весеннего, летнего и осеннего сезонов, показывает, что рост температуры с 2000 по 2013 г. в разные периоды происходил с разной скоростью (рис. 3).

Максимальные положительные коэффициенты линейного тренда температуры наблюдались в весенний сезон, где средняя температура за 14 лет выросла примерно на 2 °C. Рост средней температуры в летний сезон не превысил 1 °C за 14 лет. В осенний период температура выросла так же примерно на 1 °C за 14 лет.

#### Суммы осадков по сезонам

Наиболее влажными годами в летний период были 2008, 2009 и 2012 г. (рис. 5). При этом самым влажным было лето 2012 г. с суммой осадков, за летний период, составившей 277,3 мм. Самыми сухими летними периодами были периоды 2000, 2002, 2005, 2010 и 2011 г. Самым сухим был 2011 г. с суммарными осадками 103,4 мм.

Наиболее влажными годами в весенний период были 2004, 2006, 2007 и 2009 г. Самыми влажными были весны 2004 и 2007 г. с осадками, составившими 101,7 и 100,1 мм. С самыми сухими веснами были весны 2001, 2005, 2008 и 2012 г. При этом весной 2012 г. выпало всего 41,3 мм осадков.



Рис. 5. График осадков по станции Сыктывкар, суммарных по сезонам года, с 2000 по 2013 г.

Влажные осенние сезоны наблюдались в 2002, 2004, 2011 и 2012 г. Самой влажной была осень 2012 г. с суммой осадков 178,1 мм. Наиболее сухими были осени 2000, 2005, 2007 и 2010 г. Осенью 2000 г. выпало всего 20,5 мм осадков.

По совокупности выпавших летних и весенних осадков самым влажным годом был 2009 г., а по совокупности летних и осенних осадков 2012 г. Самые сухие весна и лето наблюдались в 2005 г., а самые сухие лето и осень в 2000, 2005 и 2010 г. По совокупности всех сезонов самыми сухими были 2005 г., а самым влажным 2012 г.

Изучение графика хода сумм осадков отдельно взятых для весеннего, летнего и осеннего периодов показывает, что рост количества с 2000 по 2013 г. в разные периоды так же, как и рост температуры воздуха происходил с разной скоростью (рис. 4).

Положительные коэффициенты линейного тренда сумм осадков наблюдались в летний сезон, где средний рост за 14 лет составил примерно 40 мм. Незначительно уменьшилось среднее количество осадков в весенний период. Максимальный рост количества осадков наблюдался осенью и составил примерно 60 мм за 14 лет.

### **Вегетационный индекс за 16-дневные периоды**

Индекс вегетации, осредненный по территории полигона, за период с 2000 по 2013 г. имел высокую межгодовую изменчивость, связанную с изменчивостью температурного и влажностного режима района (рис. 6). Основной характеристикой индекса является его постепенный рост в весенне-летний период и резкое уменьшение в осенний период. Самые низкие значения индекса на графике связаны с наличием снежного покрова, а самые высокие связаны с наиболее благоприятными условиями для развития растительного покрова.

Годами с наиболее высокими, максимальными значениями индекса, в летний период были 2003, 2006 и 2007 г. При этом, наиболее высоких значений индекс достигал летом 2007 г. и был равен 0,77 в 13-м 16-дневном периоде. Наиболее низкие значения индекса наблюдались в 2000 и 2005 г. Самое низкое значение летнего максимума индекса наблюдалось в 2009 г. и составило 0,74.

В целом, за изучаемый период, индекс вегетации постепенно рос (рис. 6), что говорит о постепенном улучшении условий для развития растительного покрова на территории изучаемого полигона и согласуется с ростом, за этот же период, количества осадков и температуры воздуха.

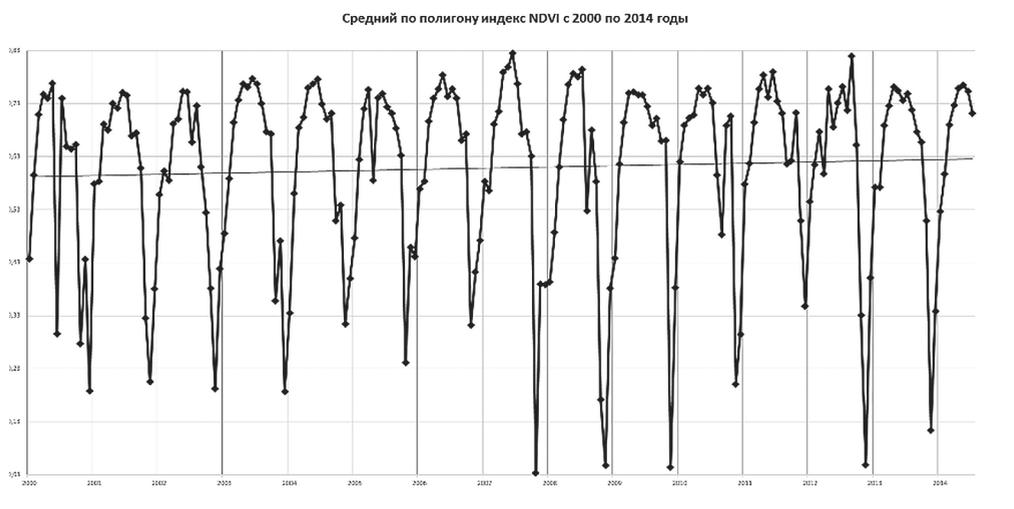


Рис. 6. График среднего по полигону индекса вегетации по 16-дневным периодам с 2000 по 2014 г.

### Вегетационный индекс по сезонам

Наиболее высокие значения индекса вегетации в летний период наблюдались в 2003, 2006 и 2007 г. При этом, самых высоких значений индекс достигал летом 2007 г. и был равен 0,77. До самых низких значений в летний период индекс падал в 2000, 2002, 2005 и 2010 г. В 2000 г. он достигал минимального значения 0,639 (рис. 7).

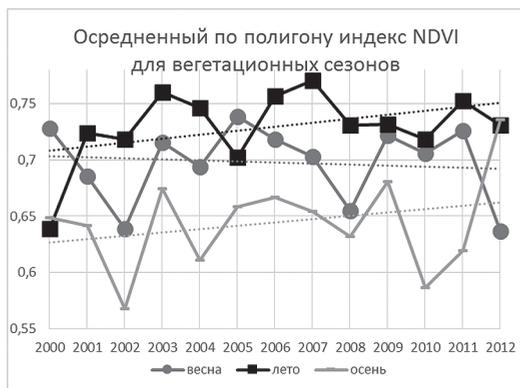


Рис. 7. График среднего по полигону индекса вегетации, осредненного по сезонам года, для периода 2000–2013 гг.

Наиболее высокие значения индекса в весенний период были в 2000, 2003, 2005, 2006, 2009 и 2011 г. До максимума в 0,739 индекс вырастал весной 2005 г. Самые низкие значения индекса весной были достигнуты в 2002, 2008 и 2012 г. Весной 2002 и 2012 г. значение индекса достигало минимальных значений за период и составило 0,639 и 0,637.

Осенью в изучаемый период индекс достигал наиболее высоких значений в 2003, 2006, 2009 и 2012 г. Самые высокие значения индекса наблюдались осенью 2012 г. и достигали значения 0,736. Самые низкие значения индекса наблюдались в 2002 и 2004, 2010 и 2011 г. Осенью 2002 г. индекс достиг своих минимальных значений в 0,567.

По совокупности летних, весенних и осенних значений наиболее благоприятными годы для вегетации были 2003 и 2006 г. Самые неблагоприятные годы для вегетации, по сочетанию летнего, весеннего и осеннего сезонов наблюдались в 2002 г., по сочетанию весеннего и летнего сезонов в 2008 г., а по сочетанию летнего и осеннего сезонов в 2010 г.

График индекса вегетации рассчитанного для весеннего, летнего и осеннего периодов показывает, что индекс с 2000 по 2013 г. в разные периоды года изменялся с разной скоростью (рис. 6). Произошло небольшое уменьшение среднего индекса в весенний период — он изменился со значения примерно 0,7 до 0,69. Наибольший рост индекса произошел в летний период со значений примерно 0,71 до 0,75. Так же рост наблюдался в осенний период со значения 0,63 до значения примерно значения 0,66.

### **Исследование трендов индексов вегетации для разных типов растительного покрова на территории полигона**

Как уже было указано выше, характеристики индекса вегетации зависят от видового состава растительности, ее сомкнутости, состояния, экспозиции и угла наклона поверхности. В связи с этим, для разных типов растительного покрова, расположенных в одних и тех же климатических условиях, может наблюдаться различная динамика индекса вегетации. Следующий этап нашего исследования был посвящен изучению многолетних трендов индекса для различных областей полигона, которые заняты разными типами растительного покрова. Целью проведения исследований этого этапа было выявление наиболее чувствительных, к изменению климатических условий, типов растительности. Для решения поставленной задачи были рассчитаны линейные тренды индекса вегетации для каждого пикселя массива данных и построены карты коэффициентов линейных трендов индекса для каждого из сезонов в отдельности (рис. 8).

Анализ карт трендов показывает, что весной, летом и осенью, большую часть территории полигона занимают области положительных трендов индекса вегетации. Наиболее ярко выражены области положительных трендов индекса, что согласуется с выводами, полученными при анализе индекса вегетации, осредненному для всего изучаемого района. Наименьшую площадь занимает область положительных трендов в весенний период.

Анализ пространственного распределения трендов индекса вегетации показывает, что в районе, занятом вечнозелеными хвойными лесами, небольшой положительный тренд индекса сохраняется на протяжении всех трех сезонов. В районах нелесных

земель, занятых кустарниковой и луговой растительностью, летом расположены области максимальных значений тренда. В весенний и осенний периоды, для нелесных земель, тренды в основном нейтральные. При этом, области положительных трендов сохраняются на нелесных землях, расположенных в поймах рек.

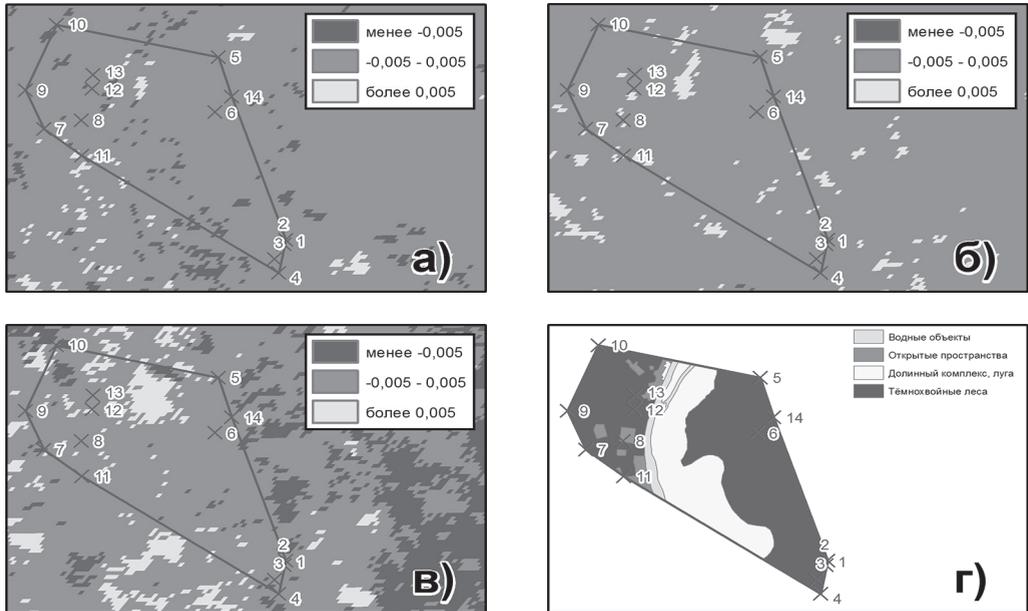


Рис. 8. Карты пространственного распределения трендов индекса вегетации по территории полигона в весенний сезон (а), летний сезон (б), осенний сезон (в). На карте (г) представлено распределение типов растительного покрова по территории полигона. Номерами указаны реперные точки полигона, в которых проводились наземные наблюдения

### Выводы

Проведенное исследование многолетней динамики климатических характеристик и вегетационного индекса за период 2000–2013 гг. на пространстве тестового полигона, а также их взаимосвязи позволяет сделать перечисленные ниже выводы.

1. В изучаемый период времени в теплую половину года происходил постепенный рост температуры воздуха и осадков. Положительный, статистически значимый тренд сумм осадков наиболее четко выражен осенью, а положительный значимый тренд температуры весной. Для отдельных лет изучаемого периода наблюдался значительный разброс температуры воздуха и осадков. Самым теплым был 2010, а самым холодным 2002 г. Самыми влажным был 2012, а самым сухим 2005 г.
2. В полном соответствии с датами экстремальных, в температурно-влажностном режиме, лет индекс вегетации достигал самых низких значений в 2002, 2008 и

2010 г. Самые благоприятные условия для вегетации растений наблюдались в 2003 и 2006 г. В целом, за изучаемый период, индекс вегетации постепенно рос и, следовательно, происходило улучшение условий роста растений.

3. В целом, на территории полигона наблюдаются положительные тренды индекса вегетации, что согласуется с ростом температуры воздуха и осадков в изучаемый период времени. В областях, занятых вечнозелеными хвойными лесами, небольшой положительный тренд индекса сохраняется на протяжении всех трех выделенных вегетационных сезонов. Летом в районах занятых нелесными землями наблюдаются максимальные положительные тренды индекса вегетации, что хорошо согласуется с наиболее значительным положительным трендом температуры воздуха в этот же сезон. В весенний и осенний периоды, области положительных трендов сохраняются только на нелесных землях, расположенных в поймах рек.
4. Климатические изменения, происходившие в теплый период года, наиболее ярко проявляется на нелесных землях пойм рек. Наиболее ярко эти изменения выражены в летний вегетационный сезон. В этой связи состояние растительного покрова пойм рек в летний сезон может служить климатическим индикатором в дальнейших исследованиях.

### **Литература**

1. *Василевич М.И., Елсаков В.В., Щанов В.М.* Применение спутниковых методов исследований в мониторинге состояния лесных фитоценозов в зоне выбросов промышленного предприятия. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014, т. 11, № 1, с. 30–42
2. Объяснительная записка. Проект организации и развития лесного хозяйства Сыктывкарского мехлесхоза Министерства лесного хозяйства Коми АССР Министерства лесного хозяйства РСФСР. Кн. 1. — Л., 1988, с. 10–18.
3. Растительность европейской части СССР. — Л.: Наука, 1980. — 429 с.
4. *Садоков В.П., Козельцева В.Ф., Кузнецова Н.Н.* Определение весенних дат устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0, +5 °С, их прогноз и оценка. // Труды Гидрометцентра России, 2012, вып. 347, с. 162–172.
5. *Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. // Геоматика, 2009, № 3(4), с. 28–32.
6. *Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.P., Randerson J.T., Houghton R.A.* Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. // Environmental Research Letters, 2007, vol. 2, no. 4, 045031. — doi:10.1088/1748-9326/2/4/045031.
7. *Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A.* Spatial heterogeneity of tundra vegetation response to recent temperature changes. // Global Change Biology, 2006, № 12, pp. 42–55.
8. *Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A.* Vegetation greening in the Canadian Arctic related to decadal warming. // Journal of Environmental Monitoring, 2009, № 11, pp. 2231–2238.
9. *Kattsov V.M.* Arctic climate in the 21<sup>st</sup> century: Modelling and scenarios. Vulnerability to global environmental change. // A summary of climate change impact assessments from the U.S. Country Studies Program. — Cambridge University Press, 2004, pp. 99–150.
10. *Krankina O.N., Pflugmacher D., Hayes D.J., McGuire A.D., Hansen M.C., Høme T., Elsakov V., Nelson P.* Vegetation Cover in the Eurasian Arctic: distribution, monitoring, and role in carbon cycling. Chapter 5. Eurasian arctic land cover and land use in a changing climate. Springer, 1<sup>st</sup> edition, 2010, 7908 p.
11. *Stow D.A., Hopea A., McGuire D., Verbylac D., Gamond J., Huemmliche F., Houstond S., Racinef C., Sturm M., Tapeh K., Hinzman L., Yoshikawai K., Tweediej C., Noylek B., Silapaswanl C., Douglasm D., Griffithn B., Jiao G.,*

- Epsteino H., Walkerp D., Daeschnera S., Petersena A., Zhouq L., Myneni R.* Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. // *Remote Sensing of Environment*, 2004, № 89, pp. 281–308.
12. *Walker M.D., Wahren C.H., Hollister R.D., Henry G.H.R., Ahlquist L.E., Alatalo J.M., Bret-Harte M.S., Calef M.P., Callaghan T.V., Carroll A.B.* Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, № 103(5), pp. 1342–1346.
13. *Wookey P.A., Aerts R., Bardgett R.D., Baptist F., Brathen K.A., Cornelissen J.H.C., Gough L., Hartley I.P., Hopkins D.W., Lavorel S., Shaver G.R.* Ecosystem feedbacks and cascade processes: understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change. // *Global Change Biology*, 2009, vol. 15, pp. 1153–1172.
14. Электронный ресурс: [<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/index.php>].