

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ СПУТНИКОВЫХ СЪЕМОК ДЛЯ АНАЛИЗА ЗНАЧЕНИЙ ХЛОРОФИЛЛЬНОГО ИНДЕКСА ТУНДРОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ

© 2013 г. В. В. Елсаков

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Сыктывкар

E-mail: elsakov@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 23.04.2012 г.

В работе рассмотрены возможности использования материалов спектральнональных спутниковых съемок для анализа временных изменений и широтных особенностей распределения значений хлорофилльного индекса в доминирующих фитоценозах тундровой зоны. Для модельного участка южных гипоарктических тундр среднее значение показателя составило 6.4 кг/га. На основании привлечения материалов съемки MODIS показаны географические закономерности распределения показателя и выявлены участки, связанные с существенными изменениями в результате климатических флуктуаций последних десятилетий.

Ключевые слова: хлорофилльный индекс, материалы спектральнональных спутниковых съемок, климатические флуктуации

DOI: 10.7868/S0205961413010016

ВВЕДЕНИЕ

Растительный покров является основным звеном биогеоценоза, обеспечивая сток CO_2 за счет фотосинтетической аккумуляции, и определяет продуктивность экосистем, для оценки которой привлекаются газометрические, весовые, а в последнее время и дистанционные методы исследований. Основные оптические свойства фитоценозов, во многом определяемые суммарным накоплением пигментов в надземной фитомассе растений разных жизненных форм, активно используются для выделения доминирующих контуров растительного покрова (классификации), количественной оценки сезонного развития растений, выявления сукцессионных смен растительности или ее деградации.

Серии работ, выполненные в фитоценозах различных регионов (Prince, Goward, 1995; Raynolds et al., 2006; Puma et al., 2007; Huemmrich et al., 2010 и др.), демонстрируют наличие тесной коррелятивной связи между объемами поглощенной/отраженной растительным покровом энергии в диапазонах красного и ближнего ИК-излучения, поглощенной фотосинтетически активной радиацией (APAR) и продуктивностью сообществ. Все это позволяет рассматривать спектральные показатели в качестве основы для расчета количественных величин, отражающих запас пигментов и интенсивность фотосинтетически обусловленных

CO_2 -потоков, а их сезонную вариабельность — как показатель продуктивности.

В качестве показателя проективного содержания зеленых пигментов в фитоценозах введена и широко используется величина хлорофилльного индекса (ХИ, кг/га). Для различных сообществ ботанико-географических зон России отмечена положительная корреляция между годичным фотосинтетическим стоком углерода, продуктивностью сообществ и проективным содержанием хлорофилла (Воронин и др., 1995). Поэтому анализ пространственно-временных закономерностей распределения индекса позволит выявить влияние ландшафтных, географических и сезонных условий на объемы фотосинтетического связывания углерода растительными сообществами и их продуктивность.

Использование спектральных вегетационных индексов для дистанционной оценки характеристик растительного покрова связано с существенными преимуществами ввиду их меньшей зависимости от изменений яркости почв, геометрических условий освещения и наблюдения, прозрачности атмосферы (Виноградов, 1984) и может рассматриваться как интегральный показатель фотосинтетической активности наземной растительности в связи с положительной корреляцией этих показателей

$$VI = f(\text{ХИ}, \text{PAR})\epsilon, \quad (1)$$

где ХИ — проективный запас хлорофилла в растительном покрове участка; PAR — поглощенная растительным покровом фотосинтетически активная радиация; ε — коэффициент, зависящий от структурных особенностей растительных сообществ, условий съемки и состояния атмосферы. Наиболее широко среди используемых спектрально-индексных индексов привлекается нормализованный разностный индекс состояния растительного покрова (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index). Расчет показателя выполняется как нормализованная разность яркости элементов изображения (пикселей) в видимом красном диапазоне (0.6–0.7 мкм, максимум поглощения фитомассой) и ближнем ИК (0.7–1.0 мкм, максимум отражения), что позволяет рассматривать NDVI как интегральный показатель фотосинтетической активности наземной растительности

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}), \quad (2)$$

где NIR — отражение в ближней ИК-области спектра; RED — отражение в красной области спектра. Несмотря на основную роль хлорофилла в формировании спектральных свойств фитоценозов, большинство исследований, направленных на анализ распределения ХИ по спутниковым данным, в настоящее время связано с оценкой концентрации хлорофилла в водных экосистемах (Копелевич и др., 2006). Для наземных сообществ работы выполнялись преимущественно в моновидовых искусственных агроценозах (Сидько, Шевырнов, 1998; Gitelson et al., 2012; Peng et al., 2011). Чаще всего переход от спектральных показателей к физическим величинам характеристик фитоценозов проводится через показатель индекса листовой поверхности (LAI). Высокая корреляция между проективным содержанием хлорофилла и запасом наземной фотосинтетически активной фитомассы (Tieszen, Johnson, 1968), позволяет привлекать спектрально-индексные изображения и для оценки запаса наземной фитомассы различных регионов:

$$\text{ХИ} = \sum (P_{ph}c)_n, \quad (3)$$

где P_{ph} — биомасса автотрофных органов отдельных форм растений на единице площади; c — средняя концентрация хлорофилла в растениях. При выполнении подобных оценок требуется учитывать структурные особенности фитоценозов и спектр доминирующих жизненных форм их составляющих. Для сообществ, имеющих ярусную структуру или высокие значения наземной фитомассы, коррелятивные связи между показателями ослабевают (Голубятников, Денисеко, 2006). В большей степени данные зависимости прослеживаются в тундровой зоне, что связано с упрощением вертикальной структуры сообществ, снижением общего проективного покрытия, большим участием мхов и лишайников (Bliss, Matveyeva, 1992). Так, между величинами NDVI и

надземной фитомассой (г/м^2) для циркумполярной области (по съемке AVHRR) зависимость представлена в виде экспоненциальных функций (Epstein et al., 2009; Reynolds et al., 2006; Walker et al., 2003). Для приморских лугов европейского северо-востока России, с упрощенной структурой сообществ и доминированием однолетних травянистых псаммофитов, зависимость имеет линейный вид (Елсаков, Щанов, 2005).

В настоящей работе нами рассмотрены возможности использования данных спектрально-индексных съемок для оценки распределения и анализа пространственно-временных изменений показателя ХИ в пределах различных фитоценозов территории Севера Евразии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование материалов спутниковых спектрально-индексных съемок сверхвысокого разрешения QuickBird (разрешение 2.44 м) для середины вегетационного периода (06.07.2007 г.) позволило выполнить анализ коррелятивной связи спектральных показателей и величин запаса хлорофилла. Запасы хлорофилла в тундровых сообществах оценивали по данным литературных источников (Tieszen, Johnson, 1968; Шмакова, 2006; Шмакова, Кудрявцева, 2002).

В качестве модельного участка рассматривали тундровые сообщества и редколесья территории восточной части Большеземельской тундры ($67^{\circ}00' - 67^{\circ}06' \text{ с.ш.}, 54^{\circ}46' - 57^{\circ}00' \text{ в.д.}$). После выполнения геометрической коррекции и радиометрической калибровки для модельного участка была выполнена управляемая классификация с выделением доминирующих классов фитоценозов, проведен расчет средних для выделенного класса значений индекса NDVI.

Дополнительно для даты съемки в пределах модельного участка проводились измерения CO_2 -поточков методами полевой газометрии с использованием ИК-газоанализатора LiCor-6200 (Небраска, США) (Елсаков, Марущак, 2011). Полученные результаты стали основой для выявления коррелятивных связей между величинами первичной продукции (GPP), NDVI и рассчитанными значениями ХИ.

Отсутствие достаточного количества разносезонных съемок QuickBird, их относительно высокая стоимость и редкая повторность диктуют необходимость привлечения для выполнения межгодовых и сезонных оценок изменений количественных показателей фитоценозов более доступных, но имеющих более низкое пространственное разрешение сенсоров. Для таких оценок в настоящее время широко привлекаются материалы более часто выполняемой съемки Landsat (Cohen, Goward, 2004), выполненной в идентичных спек-

тральных диапазонах (0.63–0.69 и 0.76–0.90 мкм), но с более низким пространственным разрешением (30 м). В ходе выполнения исследований был проведен анализ сопоставимости данных съемок сенсоров различного разрешения для одного периода наблюдений. Полученные после классификации сцен QuickBird контуры растительности использовали для выделения однородных по составу пикселей на сцене Landsat и анализа межгодовых изменений ХИ для доминирующих классов растительности. Пиксел считался однородным по классу, если 80% пространства пиксела составлял один класс земной поверхности по более высокому разрешению.

Вариабельность показателя проективного содержания хлорофилла в различные по погодным условиям годы демонстрирует возможность выявления и анализа трендов флуктуаций показателя для исследуемой территории. Особенности распределения индекса ХИ и его изменения в пределах отдельных географических зон на региональном уровне наблюдали, используя данные съемки спутника Terra-MODIS (MOD13Q1.005) с пространственным разрешением 0.25 км за период 2000–2011 гг. (источник данных: modis.gsfc.nasa.gov). Несмотря на снижение пространственного разрешения, использование материалов среднего разрешения, с одной стороны, устраняет шумы, вызванные влиянием микро- и мезорельефа, а их высокая временная повторяемость (2 раза в сутки) позволяет снизить влияние облачности. Алгоритм выполнения работы включал: 1) предварительную подготовку базы данных индекса NDVI по 16-дневным временным композитам (максимальные величины показателя за данный период), отбор наибольших значений показателя для каждого года наблюдений ($NDVI_{MAX}$). Наиболее часто данные величины достигали максимальных значений для периода июль-август (12–15 композит); 2) выявление корреляции индекса между данными съемки спутника Terra-MODIS и QuickBird и пересчет величин $NDVI_{MAX}$ в значения ХИ по разработанной модели. На основании полученных данных для каждого пиксела итогового изображения рассчитывали средний показатель максимального проективного содержания пигментов за период 2000–2011 гг. и тренд изменения показателя для всего временного интервала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектральные вегетационные индексы в выявлении особенностей распределения проективного содержания хлорофилла и наблюдаемой продуктивности фитоценозов

Для фитоценозов Северной Евразии прослеживается общая зависимость распределения по-

казателя ХИ на территории: величина данного показателя демонстрирует широтную зональность и снижается к северу от 35–40 кг/га в средней и южной тайге и лиственных лесах до 3–4 кг/га в тундре (Воронин и др., 1995; 2004). В лесных сообществах наибольшую долю (от 70 до 90%) в общем проективном содержании хлорофилла составлял первый ярус древостоя на уровне кронаобразующего слоя (Воронин и др., 1995). Поэтому использование дистанционных методов для определения ХИ лимитировано структурой сообществ и оценки целесообразно проводить для разреженных или одноярусных фитоценозов, не превышающих величины показателя 24 кг/га (Цельникер, Малкина, 1994).

Для тундровой зоны среднее значение проективного содержания хлорофилла в фитоценозах оценено в 3.5 кг/га (Воронин, 2006). Для тундры Аляски этот показатель варьирует от 3.2 до 7.7 кг/га (Tieszen, Johnson, 1968). В микрогруппировках горных тундр Хибин показатель изменялся от 3.3 до 9.7 кг/га, с переходом на уровень сообществ амплитуда варьирования снижалась до 4.1–6.6 кг/га (Шмакова, Кудрявцева, 2002).

В рассмотренных авторами фитоценозах величина показателя снижается в следующем ряду: злаковые (11.8 кг/га) → кустарниковые/ерниковые (7.5–9.0 кг/га) → осоковые болота (7.7 кг/га) → воронично-ерниковые (5.8 кг/га) → разреженные ивняки (4.3 кг/га) → пушицево-моховые (4.2 кг/га) → кустарничково-моховые (3.6 кг/га) (Шмакова, 2006; Шмакова, Кудрявцева, 2002; Tieszen, Johnson, 1968).

Выполнение управляемой классификации спектрального спутникового изображения QuickBird позволило подготовить тематическую геоботаническую карту территории с выделением 11 классов земной поверхности. В районе выполненных полевых исследований, границы которого совпадали с границами сцены изображения (9×10.9 км), в составе растительного покрова доминировали лишайниково-моховые тундры (20.4% площади сцены), участки с березовыми редколесьями (19.0%) и ивняки (14.8%). В сумме данные сообщества локализованы на 54.2% площади изображения.

Привлечение опубликованных данных и материалов спутниковых измерений для смежных сообществ установило наличие линейной статистически значимой зависимости ($y = 24.0x - 5.1$; $n = 8$; $r^2 = 0.86$; $p = 0.01$) между величинами суммарного проективного содержания хлорофилла и спектральным вегетационным индексом NDVI. Полученная зависимость позволила экстраполировать значение показателя на все пиксели изображения и получить предварительные результаты по проективному содержанию хлорофилла, в том числе и для ранее не рассмотренных сообществ (рис. 1). Наиболее высокие показатели установлены для класса ивняков и приручейных лугов (среднее 10.3 кг/га). Отсутствие сомкнутого по-

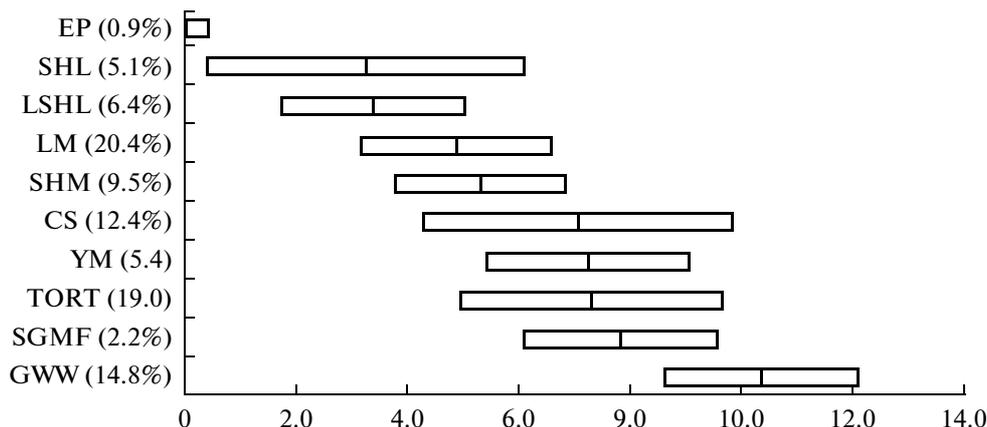


Рис. 1. Распределение показателя ХИ в выделенных классах растительного покрова по результатам моделирования: EP – эродированные торфяники (eroded peat); SHL – кустарничково-лишайниковые (shrub lichen tundra); LSHL – кустарничково-лишайниковые (low shrub lichen tundra); LM – лишайничково-моховые (lichen-moss tundra); SHM – кустарничково-моховые (low shrub moss tundra); CS – пушицево-моховые (cotton grass swamp); YM – ерничково-моховые (yernik moss tundra); TORT – березовые редколесья (sparse *B. tortuosa*); SGMF – осоково-моховые (sedge moss fen); GWW – травяные ивняки (grass willow). Представлены средние значения \pm доверительный интервал ($\bar{X} \pm tSx$, $p < 0.05$), по оси ординат приведены значения встречаемости выделенных классов сообществ, %.

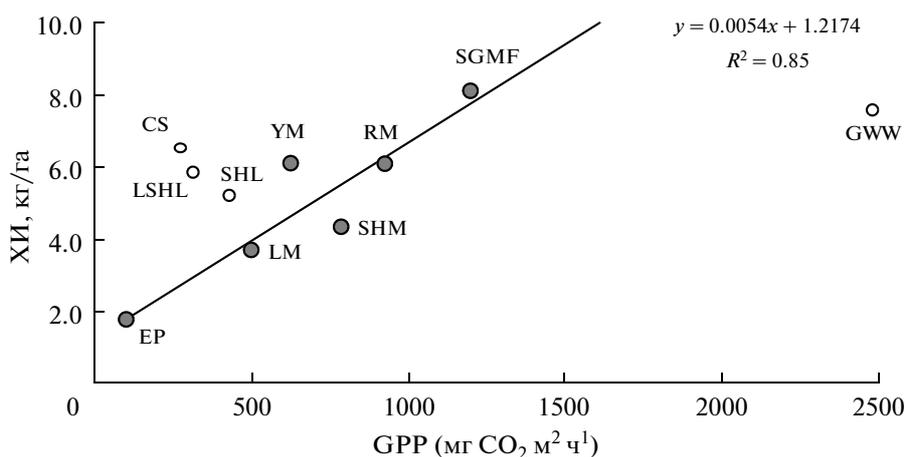


Рис. 2. Связь индекса ХИ и первичной продукции фитоценозов (GPP). Условные обозначения см. на рис. 1.

крова сосудистых растений и наличие единичных мхов на участках эродированных торфяников и песчаных раздувов определили наиболее низкие значения показателя в выделенных классах (менее 0.4 кг/га). Для нерассмотренных в литературе сообществ травяно-моховых редколесий с березой извилистой (*Betula tortuosa*) величина показателя составила 7.3 кг/га. Доминирующие в пределах рассмотренной территории классы растительности оказывают ключевое влияние на формирование средних значений показателя индекса по изображению. Для растительных сообществ территории (исключены водные объекты, участки, лишенные растительного покрова, $XI > 0$) величина индекса

составила 6.4 кг/га. Водные поверхности занимали 3.8% площади снимка.

Сочетание методов полевой газометрии с использованием ИК-газоанализатора LiCor-6200 и данных QuickBird, для одного временного интервала, выполненные в смежных фитоценозах модельного участка, показало, что между первичной продукцией (GPP) и величинами рассчитанного ХИ для большинства конкретных участков прослеживаются значимые тесные положительные корреляции ($n = 18$; $r^2 = 0.85$; $p = 0.01$) (рис. 2).

Порядка 60% рассмотренных сообществ удовлетворяют установленной линейной зависимости ($p < 0.05$, $N = 30$). Для остальных сообществ наблюдаемая интенсивность поглощения CO_2

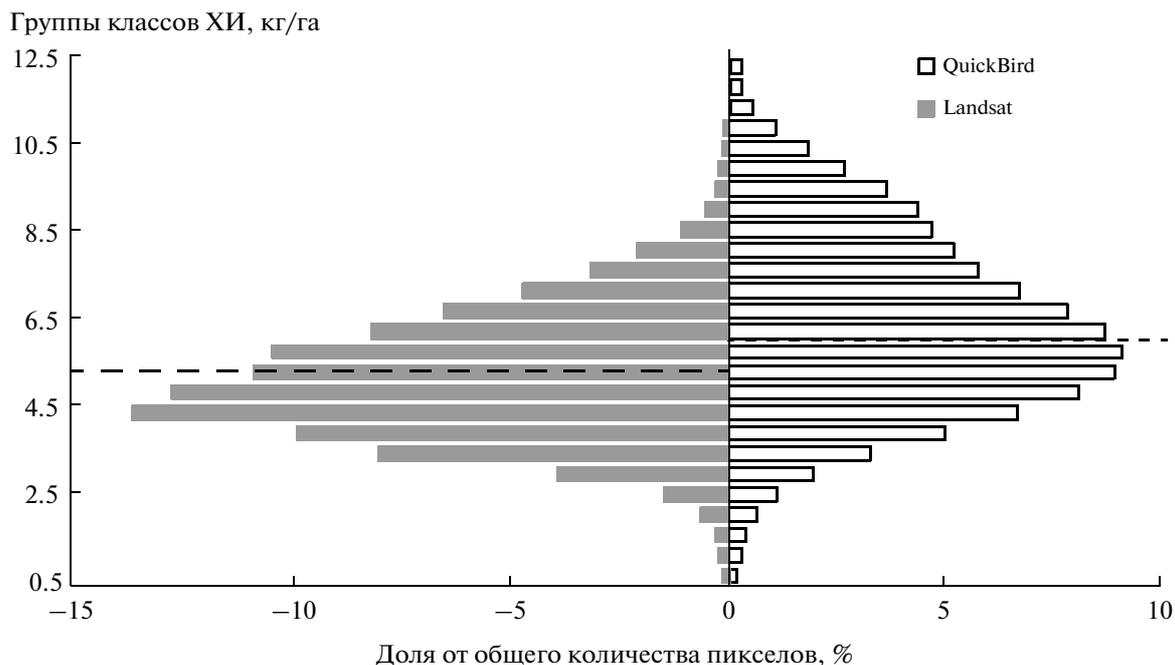


Рис. 3. Распределение значений классов ХИ для сцены Landsat и QuickBird для одного периода съемки. Пунктиром показаны средние значения по общему участку сцены ($ХИ_{Landsat} = 5.0$ кг/га; $ХИ_{QuickBird} = 6.1$ кг/га).

ниже (сообщество GWW – grass willow) и выше (LSHL – low shrub lichen tundra, SHL – shrub lichen tundra и CS – cotton grass swamp) ожидаемой. Выявленные различия могут быть обусловлены как суммарной природой регистрируемого отраженного излучения, характеризующего участок земной поверхности, так и спецификой видового состава рассмотренных фитоценозов, биологическими особенностями растений, составляющими суммарную фитомассу сообществ. Использование выявленной зависимости позволило экстраполировать результаты оценки распределения ХИ и GPP на прилегающие территории с построением тематических карт.

Межгодовые и сезонные изменения проективного содержания хлорофилла по спектральным данным

Сопоставление материалов, полученных для одного участка и времени съемки, сенсоров QuickBird (06.07.2007) и Landsat (03.07.2007) (рис. 3), показало, что в результате пространственной генерализации изображения наблюдается нивелирование крайних значений показателя на изображениях меньшего разрешения. Снижается вариабельность показателя, что вносит ошибку в выполнение сравнительного анализа количественных характеристик мозаичных участков и малых по площади фитоценозов. Однако, несмотря на занижение средних значений (общее по всей сцене: $ХИ_{Landsat} = 5.0$ кг/га; $ХИ_{QuickBird} = 6.1$ кг/га; для пикселей рас-

тительного покрова ($ХИ > 0$) $ХИ_{Landsat} = 5.1$ кг/га; $ХИ_{QuickBird} = 6.4$ кг/га), использование сцен Landsat целесообразно.

Анализ сезонных изменений индекса ХИ, выполненный для однородных по составу классов по сцене Landsat, показал, что вариабельность показателя определяется сезонными особенностями вегетационного периода и погодными условиями лет наблюдений. Несмотря на эпизодичность съемок Landsat, существенно затрудняющую анализ, общая оценка сезонных изменений параметра демонстрирует наличие существенной вариабельности. Максимальные значения показателя проективного содержания хлорофилла для разных лет не совпадают и определяются в большей степени температурными характеристиками первой части вегетационного периода (рис. 4). Так, для ивняков травяных максимумы проективного содержания хлорофилла смещались между годами на 14–30 дней. При более раннем наступлении вегетационного периода и сохранении теплого периода в 2007 г. содержание показателя достигает максимальных значений в более ранние сроки (к 3 июля). Несмотря на вариабельность ХИ в различающиеся по климатическим особенностям годы, сообщества обнаруживают сходство по величине ХИ в периоды с одинаковыми климатическими условиями. Для отдельных лет отклонение запаса хлорофилла от среднего показателя составило 2.5–17%.

Полученные результаты показывают, что точная оценка количественных значений и трендов

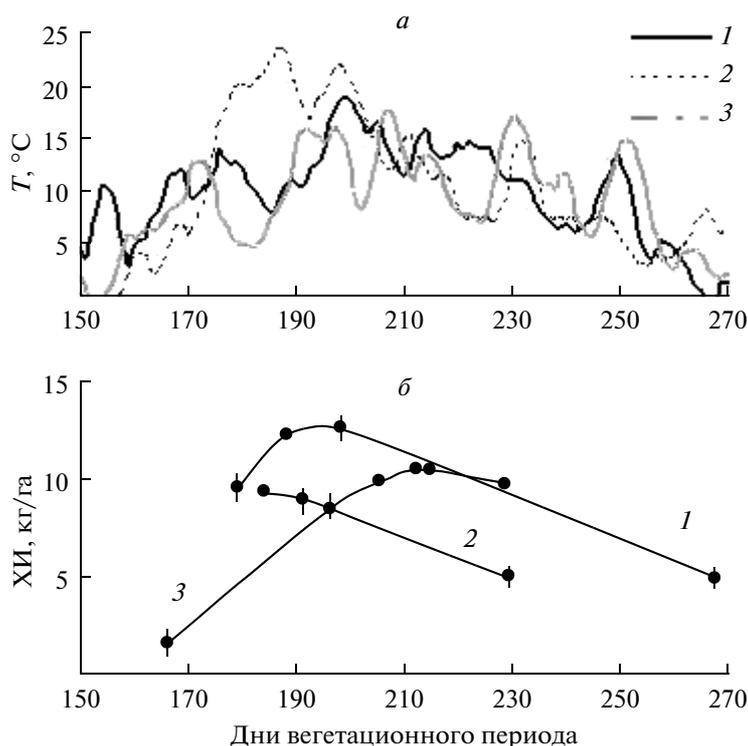


Рис. 4. *а* – Динамика усредненных за пять дней среднесуточных температур воздуха района исследований (м/ст. Воркута); *б* – изменения индекса ХИ в течение вегетационного периода для класса ивняков травяных по данным сенсоров разносезонных/разногодовых сцен Landsat-5 TM (1 – 2000 г.; 2 – 2007 г.; 3 – 2009 г.).

изменения индекса для доминирующих сообществ по данным съемки Landsat в настоящее время затруднена в силу ряда причин. Во-первых, возможно существенное смещение сроков наступления фенологических событий для лет с различающимися климатическими условиями. Влияние может оказывать и выраженная сезонная динамика содержания пигментов в растениях криолитозоны (Петров и др., 2010; Golovko et al., 2011). Поэтому выбор одних дат съемки не позволяет выполнить корректной оценки таких изменений. Во-вторых, при проведении количественных сравнений характеристик фитоценозов по оптическим спутниковым данным с разными датами, но со сходными по фенологическим особенностям развития растений параметрами, не исключена возможность регистрации изменений, обусловленных сезонными изменениями положения зенитного угла Солнца (Елсаков, Тетерюк, 2012). Данные ограничения могут быть устранены в ближайшее время с вводом в эксплуатацию новых спутниковых систем наблюдения Sentinel-2, развертываемых в рамках программы GMES (Global Monitoring for Environment and Security), и обеспечивающих возможность частых повторных съемок с интервалом в 2–3 дня.

Величины ХИ для оценки трендов климатически обусловленной трансформации растительных сообществ Севера Евразии

Анализ сходимости величин индекса NDVI по данным сенсоров MODIS и QuickBird для одной даты съемок, выполнен приведением съемки QuickBird к пространственному разрешению MODIS. Значение итогового пиксела, доведенного до размера MODIS, было рассчитано как среднее значение всех включенных в него величин пикселов QuickBird. Несмотря на наличие смещения величин в сторону увеличения значений индекса для данных MODIS, между величинами индекса, полученными разными сенсорами, наблюдали значимую среднюю по силе корреляционную зависимость ($y = 0.997x - 0.293$; $n = 1924$; $r^2 = 0.60$; $p = 0.001$) (рис. 5б). Наибольшие расхождения между величинами отмечены для участков с расположенными на них водными объектами.

Полученные линейные зависимости использовали для приведения данных съемок MODIS (значения NDVI_{MAX} разных лет) в сопоставимые со значениями QuickBird (рис. 5а) и для последующего расчета значений ХИ с привлечением ранее установленной по данным съемки QuickBird зависимости.

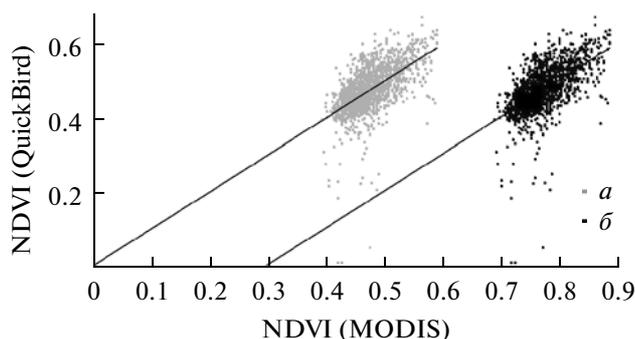


Рис. 5. Сходимость величин индекса NDVI, полученных по данным съемок MODIS и QuickBird, выполненных на одну дату: *a* – после выполнения процедуры коррекции; *б* – до ее выполнения.

Использование данных съемки Terra-MODIS показало, что распределение индекса ХИ связано с общими закономерностями распределения растительного покрова на территории Северной Евразии и отражает современную континентальную зональность, определяемую климатическими, геокриологическими и мерзлотными условиями отдельных регионов, их орографическими особенностями (рис. 6*a*). С другой стороны, демонстрирует исторические особенности расположения и деградации многолетнемерзлых пород и возможные изменения южных границ криолитозоны в современных климатических условиях. Для восточно-европейских тундр с “вялой, теплой” мерзлотой (Астахов, Свенсен, 2011) проективное содержание хлорофилла в среднем выше, чем на территории Зауралья, и представлено для участков одинаковых типов растительности (выделенных по: (Базилевич, 1993)) в диапазоне значений 5.7 ± 1.6 кг/га ($X \pm SD$). Для фрагмента Западно-Сибирских тундр той же широты значения показателя ниже и составляют 3.2 ± 1.6 кг/га. Современные климатические условия северо-востока Русской равнины отличает большая океаничность климата, что сказывается на меньшей протяженности климатических и геокриологических зон, здесь представлены преимущественно южные субарктические тундры. Немаловажное значение на сохранение в восточных регионах реликтовых многолетнемерзлых пород (ММП) оказывает и влияние более морозного и континентального климата, в то время как в регионах Европейского северо-востока оно относительно неблагоприятно и определяется прежде всего незначительной льдистостью горных пород, слагающих эти регионы (Баулин и др., 1981).

Оценка средней величины связывания атмосферного углерода различными фитоценозами тундры варьирует от 100 (Шмакова, 2006) до 314 кгС/кг хлорофилла в год (Воронин, 2006).

Перерасчет величин ХИ позволяет оценить особенности распределения фотосинтетического стока углерода в пределах исследованного региона, выполнить перерасчет в показатели биомассы и может активно использоваться при выполнении землеустроительных работ на пастбищах северного оленя. Однако при анализе влияния ценологических, зональных и ландшафтных условий на распределение фитомассы по материалам спутниковых съемок необходимо учитывать и структурные особенности фитоценозов. Так, южные тундры характеризуются значительным участием зеленых частей – преимущественно мхов и лишайников (до 40%) и одревесневевших надземных частей кустарников и кустарничков (35–40%) (Базилевич, 1993).

Согласно резервуарно-поточковой модели продукционного процесса (Воронин, 2006), растения могут быть разделены на донорную (фототрофную) и акцепторную (гетеротрофную) части, объединенные проводящей системой. Следовательно, и растительные сообщества в целом могут быть рассмотрены как составленные из комбинаций автотрофных/гетеротрофных частей. Данные спектральной съемки отражают преимущественно параметры, формирующиеся донорными частями растений. Для большинства тундровых сообществ, составленных в основном однолетними растениями, модель упрощена, и первичная продукция фотосинтеза (NPP) достаточно тесно связана с фотосинтетическим стоком углерода (*Ph*). Большинство таких сообществ описывается уравнением, представленным на рис. 2.

Сравнение полученных значений с результатами, установленными ранее для района Воркутинского мерзлотного стационара (Елсаков, 2003), показало, что интенсивность ожидаемого поглощения CO_2 , оцененная по запасам надземной фитомассы, выше наблюдаемого в сообществах с доминированием в фитомассе растений акцепторной части. Так, для сообществ SGMF (sedge moss fen) с менее сомкнутой осокой водной (*Carex aquatilis*) за вегетационный сезон около 59% CO_2 аккумулируется в надземной фитомассе. Из них в надземной биомассе сосудистых растений за вегетационный период аккумулируется 14.5% углерода (12.1% – в массе *C. aquatilis*), во мхах – 44.5%. С ростом уровня мохового покрова модельных площадок и плотности мохового слоя увеличивается количество углерода, ассимилированного в моховом слое. Для пушицево-мохового (CS – cotton grass swamp) и мохового сообществ данные величины составили 74.2 и 87.2% соответственно. Вместе с тем снижаются доля углерода, запасенного в надземной биомассе сосудистых растений (6.1 и 3.5%), и доля “неучтенного” запаса углерода (19.8 и 9.3%). В кустарничково-моховом и кустарничково-лишайниково-моховом сообществах зе-

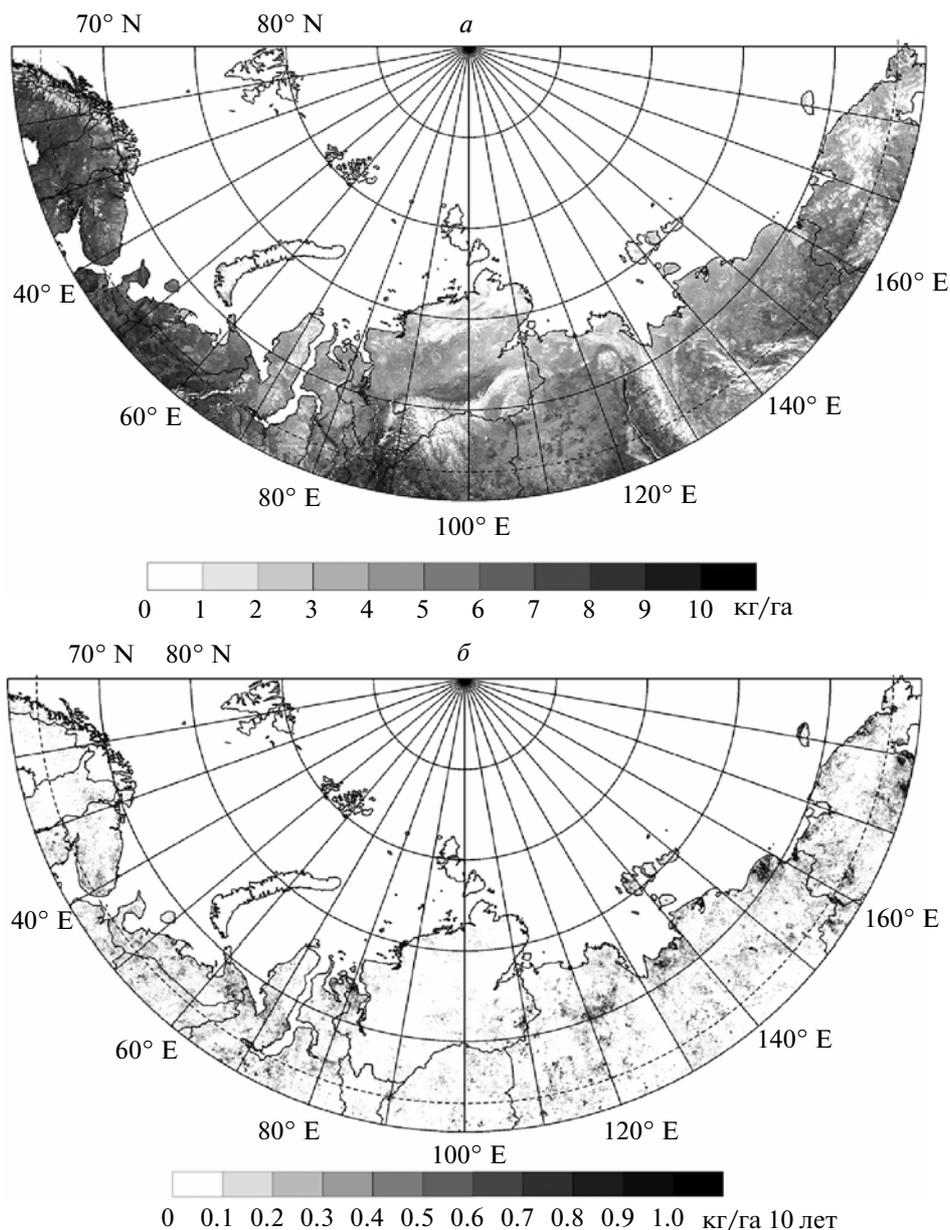


Рис. 6. *a* – Распределение средних значений ХИ на территории Северной Евразии по материалам спутниковых данных MODIS; *б* – тренды роста показателя для периода 2000–2011 гг.

ленные части сосудистых растений депонируют 5.7 и 17.5% углерода от NPP.

Анализ межгодовой вариабельности значений и обобщенного тренда изменений ХИ показал, что динамика показателя в пределах Северной Евразии имеет территориально неоднородную структуру и во многом зависит от распределения ММП. Несмотря на наличие межгодовых погодных изменений, ответная реакция показателя выражена на территории незначительно, что определяется влиянием сглаживающего эффекта мерзлых толщ, находящихся в равновесном состоянии

с усредненными климатическими параметрами нескольких лет.

Более суровые мерзлотные условия Зауралья, сформированные в континентальных областях, в меньшей степени подвержены климатическим влияниям. Отмеченные нами участки устойчивых изменений, по-видимому, маркируют территории с перестройками мерзлотно-климатических условий. Они преимущественно связаны с быстрым развитием ивняков (аэровизуальные наблюдения) на территориально сопряженных участках в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород (рис. 6б). Сопоставление полученных

результатов с ранее выполненными наблюдениями за временными изменениями криогенных ландшафтов территории (Елсаков, Марушак, 2011) позволяет соотнести рост продуктивности фитоценозов на отдельных участках с увеличением глубины протаивания сезонно-талого слоя и ростом температуры верхней кровли ММП, отмечаемым в последние десятилетия (Природная ..., 2005).

Наиболее существенный рост показателей ХИ (0.07–0.1 кг/га за год) соответствует увеличению аккумуляции углерода в биомассе с интенсивностью от 7 до 30 кгС/га в год. Участки интенсивного роста показателя не формируют ярко выраженного широтного пояса, их расположение подчинено скорее региональным особенностям. Данные территории спорадически расположены и отмечены на Европейском Севере (восток Кольского п-ова, в Малоземельской и Большеземельской тундрах на участках сквозных таликов, на Пай-хое), Западной (южная часть п-ва Ямал и восток Гыданского п-ова), Средней (среднее течение р. Оленек) и Восточной Сибири (восток Яно-Индигирской тундры и Колымская тундра), ряде арктических островов (север о-ва Врангеля и восток о-ва Котельный).

Выявленные участки роста показателя ХИ приурочены к территориям, испытывающим наиболее существенные изменения. Так, для Нижнеколымского района (пастбища общины “Турваургин”) отмечено катастрофическое сокращение и деградация пастбищных угодий северного оленя (до 30% территории), связанная с быстрым распространением кустарников (Шадрин, 2009). Анализ ценотической активности и видового богатства широтных географических элементов видов сосудистых растений и лишайников разных ценофлор позволил зафиксировать увеличение влажности и уменьшение тепла в ерниково-кустарничково-лишайниково-моховых и дриадовых тундрах (в подзоне южных тундр) Ямала (Телятников, 2002).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты демонстрируют широкие возможности использования материалов спектрозональных спутниковых съемок для количественной оценки распределения показателя ХИ и анализа его сезонных и межгодовых изменений на уровне отдельных фитоценозов, типов растительности и ботанико-географических зон. Привлечение сцен съемки разных лет позволяет установить интенсивность и направленность временных трансформаций фитоценозов (динамическое картографирование), выделить роль ландшафтных (фациальных), геоморфогенных и климатогенных условий в формировании углеродного баланса экосистем, проследить пространственные закономерности его формирования на уровне отдельных регионов. Вместе с тем фрагментарность

полевых геоботанических и экологических исследований, выполненных для различных регионов территории, затрудняет корректную оценку зональных и долготных различий характеристик фитоценозов. Это диктует необходимость организации региональных баз данных показателя с учетом изменений сезонных и пространственно-временных характеристик.

Для большинства рассмотренных зон отмечена стабильность показателя развития в условиях невысокой межгодовой флуктуации. Однако полученные результаты демонстрируют и наличие трендов изменения фитоценозов арктического региона, связанных с флуктуацией климата. Использование показателя ХИ как косвенного признака позволяет оценить изменения продуктивности фитоценозов. Вариабельность величин показателя маркирует наличие участков, реагирующих на глобальные изменения, и позволяет выделить территории, испытывающие существенные перестройки в связи с изменением криогенных условий.

Работа выполнена в рамках выполнения программы научных исследований Уральского отделения РАН “Реакция экосистем криолитозоны Европейского Севера и Западной Сибири на климатические флуктуации последних десятилетий” (12-С-4-1018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астахов В.И., Свенсен Й.И.* Покровная формация финального плейстоцена на крайнем северо-востоке европейской России // Региональная геология и металлогения. 2011. № 47. С. 12–27.
- Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
- Баулин В.В., Данилова Н.С., Суходольская Л.А.* История развития многолетнемерзлых пород на территории СССР и методы ее изучения // История развития многолетнемерзлых пород Евразии. М.: Наука, 1981. С. 24–40.
- Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
- Воронин П.Ю.* Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода Северной Евразии // Физиология растений. 2006. Т. 53. № 5. С. 777–785.
- Воронин П.Ю., Ефимцев Е.И., Васильев А.А., Ватковский О.С., Мокроносов А.Т.* Проективное содержание хлорофилла и биоразнообразие растительности основных зон России // Физиология растений. 1995. Т. 42. № 2. С. 295–302.
- Воронин П.Ю., Коновалов П.В., Болондинский В.К., Кайбияйнен Л.К.* Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода в леса Северной Евразии // Физиология растений. 2004. Т. 53. № 5. С. 777–785.
- Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А.* Взаимосвязь вегетационного индекса с климатическими параметрами и структурными характеристиками растительного покрова // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 4. С. 524–538.

- Елсаков В.В.* Аккумуляция азота и углерода надземной массой растений в сообществах Большеземельской тундры. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2003. № 461. 28 с.
- Елсаков В.В., Марущак И.О.* Межгодовые изменения термокарстовых озер Северо-востока Европейской России // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 45–57.
- Елсаков В.В., Марущак М.* Спектрональные данные в оценке аккумуляции углерода фитоценозами Воркутинской тундры // Резервуары и потоки углерода в лесных и болотных экосистемах бореальной зоны. Сыктывкар, 2011. С. 40–41.
- Елсаков В.В., Тетерюк Л.В.* Спутниковые изображения в изучении влияния рельефа на формирование флористического своеобразия фитоценозов карстовых ландшафтов европейского северо-востока России // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 78–93.
- Елсаков В.В., Щанов В.М.* Особенности спектральных характеристик приморских лугов восточного побережья Малоземельской тундры // Биоразнообразие наземных и водных экосистем охраняемых территорий Малоземельской тундры и прилегающих регионов. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2005. № 178. С. 5–20.
- Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В.* Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биологических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвет // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. 2006. Вып. 3. Т. 2. С. 99–105.
- Петров К.А., Софронова В.А., Чепалов В.А., Перк А.А., Максимов Т.Х.* Сезонные изменения содержания фотосинтетических пигментов у многолетних травянистых растений криолитозоны // Физиология растений. 2010. Т. 57. № 2. С. 192–199.
- Природная среда в условиях открытой разработки угля (на примере Юньягинского месторождения) / Под ред. М.В. Гецен. Сыктывкар, 2005. 246 с.
- Сидько А.Ф., Шевырнов А.П.* Изучение сезонной зависимости спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур от содержания хлорофилла и физиологических параметров растений // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 96–105.
- Телятников М.Ю.* Растительный покров как индикатор изменений климата в субатлантическую фазу голоцена (на примере субарктических тундр полуострова Ямала) // Сибирский экол. журн. 2002. Т. 9. № 4. С. 461–472.
- Цельникер Ю.Л., Малкина И.С.* Хлорофильный индекс как показатель годичной аккумуляции углерода древостоями леса // Физиология растений. 1994. Т. 41. № 3. С. 325–330.
- Шадрин В.И.* Коренные народы в условиях изменения климата (на примере народов Севера Якутии) // Вопросы истории и культуры северных стран и территорий. 2009. Т. 2. № 6. С. 95–101.
- Шмакова Н.Ю.* Формирование и трансформация органического вещества в растительных сообществах горной тундры Хибин: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Петрозаводск, 2006. 40 с.
- Шмакова Н.Ю., Кудрявцева О.В.* Сравнительная оценка листового и хлорофилльного индексов для определения годичной продукции органического вещества в сообществах горной тундры Хибин // Ботанический журн. 2002. № 3 Т. 87. С. 85–98.
- Bliss L.C., Matveyeva N.V.* Circumpolar Arctic Vegetation // Arctic ecosystems in a changing climate. An ecophysiological perspective / Eds. F.S. Chapin, R.L. Jefferies, J.F. Reynolds, G.R. Shaver, J. Svoboda, E.W. Chu. San-Diego, CA: Academic Press, 1992. P. 59–89.
- Cohen W., Goward S.* Landsat's role in ecological applications of remote sensing // Biosci. 2004. V. 54. № 6. P. 535–545.
- Epstein H.E., Walker D.A., Raynolds M.K., Kelley A.M., Jia G.J., Ping C.L., Michaelson G.J.* Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra // AGU Fall Meeting. San Francisco, CA. 2009. № 90:GC31A-0697.
- Golovko T., Dymova O., Yatsco Y., Tabalenkova G.* Photosynthetic Pigments Apparatus in the Northern Plants // Handbook of plant and crop stress. 3d Edition / Eds. M. Pessarakli. N.Y.: Marcel Dekker, Inc., 2011. P. 391–405.
- Gitelson A.A., Peng Y., Masek J.G., Rundquist D.C., Verma Sh., Suyker A., Baker J.M., Hatfield J.L., Meyers T.* Remote estimation of crop gross primary production with Landsat data // Rem. Sens. Env. 2012. V. 121. P. 404–414.
- Huemrich K.F., Gammon J.A., Tweedie C.E., Oberbauer S.F., Kinoshita G., Houston S., Kuchy, Hollister R.D., Kwon H., Mano M., Harazono Y., Webber P.J., Oechel W.C.* Remote sensing of tundra gross ecosystem productivity and light use efficiency under varying temperature and moisture conditions // Rem. Sens. Env. 2010. V. 114. P. 481–489.
- Peng Y., Gitelson A.A., Keydan G., Rundquist D.C., Moses W.* Remote estimation of gross primary production in maize and support for a new paradigm based on total crop chlorophyll content // Rem. Sens. Env. 2011. V. 115. P. 978–989.
- Prince S.D., Goward S.N.* Global primary production: a remote sensing approach // J. Biogeogr. 1995. № 22. С. 815–835.
- Puma I.P., Philippi Th.E., Oberbauer S.F.* Relating NDVI to ecosystem CO₂ exchange patterns in response to season length and soil warming manipulations in arctic Alaska // Rem. Sens. Env. 2007. V. 109. № 2. P. 225–236.
- Raynolds M.K., Walker D.A., Maier H.A.* NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic // Rem. Sens. Env. 2006. V. 102. P. 271–281.
- Tieszen L.L., Johnson P.L.* Pigment Structure of Some Arctic Tundra Communities // Ecology. 1968. V. 49. № 2. P. 370–373.
- Walker D.A., Epstein H.E., Jia J.G., Balsler A.W., Copass C., Edwards E.J., Gould W.A.* Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. d2:8169.

Use of the Satellite Data in Chlorophyll Index Investigation at Tundra Communities

V. V. Elsakov

Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar

The publication analyze possibility of different spatial resolution satellite data using for estimation of spatial and temporal features of chlorophyll index at dominant tundra communities. The average chlorophyll index content at tundra communities of European south hypoarctic zone was 6.4 kg/ha. The MODIS satellite data for 2000–2011 demonstrate main geographic regularities of index distribution and changes related with climate fluctuation of last years.

Keywords: chlorophyll index, remote sensing methods, climatic changes