

Спутниковая съемка в оценке продуктивности экосистем Европейского Севера

В.В. Елсаков

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН
167610 Сыктывкар, Коммунистическая, 28
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru*

В работе проведен анализ возможностей использования материалов спектрально-зональной съемки различного разрешения в сочетании с измерениями CO_2 -газообмена для комплексной пространственно-временной оценки продуктивности экосистем и анализа их изменений на Европейском Севере. В ходе выполнения исследования разработана модель, описывающая особенности изменений фотосинтетического стока углерода в тундровые фитоценозы и его временные изменения по спектральным величинам под влиянием климатических флуктуаций последних десятилетий.

Ключевые слова: продуктивность экосистем, тундровые фитоценозы, CO_2 -газообмен, спектрально-зональная спутниковая съемка.

Введение

Наземные тундровые экосистемы северного полушария занимают 5.6 млн. км² поверхности (5–6% площади) (Wookey, 2002), в большинстве случаев это слабоосвоенные и труднодоступные территории. Широкий интерес к региону обусловлен множеством причин – ролью в формировании климата отдельных территорий, наличием неосвоенных запасов углеводородов и минерального сырья и др. Существенна роль данных территорий и в формировании углеродного баланса планеты: в них сосредоточено почти 11% всего запаса органического вещества, включая энергетические ресурсы (Карелин и др., 1996). Среди наиболее чувствительных индикаторов любых экосистемных перестроек региона являются, прежде всего, показатели состояния растительного покрова (видовой состав, структура, функциональная активность компонентов), поскольку они отражают *интегральное воздействие* любых возмущающих факторов. Интегральная природа полученных оценок обусловлена подверженностью растительных сообществ как прямому, так и опосредованному влиянию любых природных и антропогенных факторов. Вместе с тем, растительный покров является основным звеном, обеспечивающим сток углерода за счет фотосинтетической аккумуляции, и характеризует продуктивность экосистем, которая может быть оценена газометрическими, весовыми, а в последнее время и дистанционными методами исследований. Объем годового прироста запасов углерода (прежде всего фитомассы) в сообществах Арктики оценивается авторами в размере 0.096 Гт (Gorham, 1991), годовая первичная нетто-продукция (NPP) наземных экосистем тундровой зоны России составляет 121 - 125 гС/м² (Швиденко и др., 2001). Для тундр Аляски она оценена в объеме 82 гС/м² (Johnson et al., 1970).

В настоящее время изучение изменений продуктивности экосистем сфокусировало внимание на выявлении особенностей их формирования в условиях влияния экологических и климатических факторов, что важно для оценки интенсивности и направленности изменений арктического региона. Так, в течение последних лет достаточно много внимания было уделено аккумуляции углерода газометрическими методами измерений заболоченных территорий Северной Америки (Vubier et al., 1998), Фенноскандии (Alm et al., 1999; Waddington, Roulet, 2000) и Сибири (Замолодчиков и др., 1997). Наряду с этим относительно небольшое число исследований затрагивает вопросы углеродного и азотного балансов территорий Большеземельской тундры (Zamolodchikov, Karelin, 2001). Среди возможных методов оценки углеродной составляющей и показателей продуктивности все большее внимание уделяется технологиям

дистанционного зондирования. Серии работ, выполненные в фитоценозах Арктического региона (Huemmerich et al., 2010; Inga et al., 2007), демонстрируют наличие тесной коррелятивной связи между величинами поглощенной/отраженной растительным покровом энергии в диапазонах красного и ближнего инфракрасного излучения, фотосинтетически активной радиацией и продуктивностью сообществ (*GPP*, *NPP*). Ряд моделей рассматривает нормализованный разностный индекс растительного покрова (*NDVI*) в качестве основной характеристики при расчетах показателей продуктивности. Так установлена связь между величинами *NDVI* и надземной фитомассой тундровых сообществ в виде логарифмических (Raynolds et al., 2006; Walker et al., 2003; Epstein et al., 2009) и линейных (Елсаков, Щанов, 2005) зависимостей. Все это позволяет рассматривать спектральные показатели и широко используемый индекс *NDVI* в качестве величин, отражающих интенсивность фотосинтетически обусловленных CO_2 – потоков, а их сезонную вариабельность как показатель продуктивности.

Цель настоящей работы состояла в выявлении возможностей использования материалов спектральной съемки в комплексной оценке продуктивности экосистем и анализе их изменении на Европейском Севере. Для выполнения работы были сформулированы следующие задачи: 1. подобрать серии полевых газометрических измерений (CO_2 -газообмен) и спутниковых изображений детального разрешения Quickbird для сходных дат одних модельных площадок; 2. выполнить анализ коррелятивных связей спектральных величин и измеренных показателей фотосинтетического стока углерода (*Ph*); 3. Оценить роль пространственного разрешения спутниковых изображений в оценке показателей продуктивности фитоценозов; 4. разработать модель, описывающую ландшафтные особенности изменений фотосинтетического стока углерода (*Ph*) и его временные изменения по спектральным величинам под влиянием климатических флуктуаций последних десятилетий.

Материалы и методы

Полевые наблюдения были выполнены на протяжении вегетационных периодов 1999 г. и 2007 г. на модельных участках, расположенных в бассейне р. Лек-Воркута и Сейда в 60 км и 80 км в юго-западном смещении от г. Воркута. Современный рельеф района имеет характер пологоувалистой равнины, расчлененной системой рек и ручьев. Основными ортографическими элементами являются водораздельные холмисто-грядовые возвышенности – «мусюры» с плоскими и слабовыпуклыми вершинами, со слабоволнистой поверхностью и длинными пологими склонами. Модельные площадки (на каждом участке было заложено по 30 площадок) были оконтурены квадратными алюминиевыми кольцами (60 x 60 см) и находились в пределах естественных границ десяти классов земной поверхности. На модельных площадках в течение всего полевого сезона проводили газометрические наблюдения за потоками CO_2 общепринятыми методами (Alm et al., 1997; Carrol, Crill, 1997). Для данных целей был использован полевой инфракрасный газоанализатор LiCor-6200 (Nebraska, USA) в сочетании с изолированной от атмосферы пластиковой камерой (средний объем 0.104 м³). Герметичность между камерой и алюминиевыми кольцами достигалась при помощи водного затвора. В ходе работы фиксировали наблюдаемые величины валового дыхания (R_{TOT}) и чистого потока углерода (NEE), которые использовались для расчёта значений наблюдаемой первичной продукции (P_G) ($P_G = \text{NEE} - R_{\text{TOT}}$).

Часовые и дневные значения P_G и R_{TOT} для каждой модельной площадки были смоделированы с использованием статистических отношений между CO_2 газообменом и микроклиматическими параметрами (Alm et al., 1997). Дневные значения P_G и R_{TOT} были рассчитаны для всего периода наблюдений, а их сумма позволила выявить нетто продукцию экосистемы (NEP). Более детальная информация по методике расчета сезонных значений R_{TOT} , NEE и NEP для модельных площадок представлена в ранее опубликованной нами работе (Heikkinen et al., 2002).

Для модельных участков были подобраны спутниковые изображения детального разрешения для одних дат съемки (с однотипными эколого-климатическими условиями) в которые выполняли газометрические наблюдения: QuickBird (07.07.06). Для пикселей изображения, в которых находились площадки измерений, рассчитывали значения NDVI и выявляли особенности коррелятивной связи спектральных величин с результатами газометрических измерений. На основании полученных величин рассчитывали распределение первичной продукции экосистем тундры на конкретный момент съемки (10:56 6.7.2007).

Вместе с тем, оценка сезонных и межгодовых изменений показателей продуктивности фитоценозов по материалам временных серий съемки Quickbird в настоящее время затруднена в силу ограниченной их доступности. Альтернативой такого сравнения является привлечение и составление широкого корпуса временных серий более доступных сцен изображений (Landsat, SPOT, ASTER, а в ряде случаев MODIS), но имеющих более низкое пространственное разрешение. Для оценки роли пространственного разрешения в оценке количественных характеристик растительного покрова были сопоставлены данные съемки на один временной период (таблица 1) сенсоров Landsat TM (L5TML1A 167/013 для 07.07.03) и спектрально-изобразительные QuickBird (07.07.06), после предварительной калибровки (Krause, 2003; Holekamp, 2006) и перерасчете излучения на сенсоре ($W/m^2 sr \mu m$). Этому способствует и тождественность спектральных диапазонов красного (0.63-0.69 мкм) и ближнего инфракрасного сенсоров (0.76-0.90 мкм) QuickBird и Landsat, калиброванные величины одних каналов сравниваемых сенсоров имеют сходные радиометрические показатели (Thomas, 2004).

Таблица 1. Параметры съемки Quickbird и Landsat

	SunAz	SunEl	meanSatAz	meanSatEl
Quickbird 6 Jul 2007 UTC 10:56:14	181.0	45.8	283.8	78.5
Landsat TM 5 3 Jul 2007 UTC 7:11:28	167.0	45.6	-	-

Использование метода главных компонент легло в основу проведения и управляемой классификации растительности сцены QuickBird с выделением доминирующих классов земной поверхности. Составление и сравнительный анализ временных серий разных лет спутников более низкого разрешения позволило установить основные особенности сезонных и межгодовых изменений спектральных характеристик и индекса NDVI на исследованной территории и оценить изменения продуктивности сообществ за отдельные годовые интервалы.

Результаты работы

Для модельных площадок измерены значения чистого потока углерода (NEE) варьировали в течение вегетационного сезона в пределах -104 мг за час (эмиссия) в кустарничково-моховом сообществе и 250 мг CO_2-C/m^2 час (поглощение) в осоково-моховом сообществе с доминированием *осоки водяной* и *сфагнума балтийского*. Сочетание методов полевой газометрии с показаниями инфракрасного газоанализатора LiCor-6200 (Nebraska, USA) с данными спектрально-изобразительных съемок спутника Quickbird, полученных на одну дату (6 июля 2007 г.), для одних и тех же фитоценозов модельного участка Воркутинской тундры в окрестностях пос. Сейда показал, что между первичной продукцией (*GPP*) и спектральными параметрами (в частности индексами *VI*, *NDVI* и др.), прослеживаются значимые тесные положительные корреляции (0.8-0.92) (рис. 1).

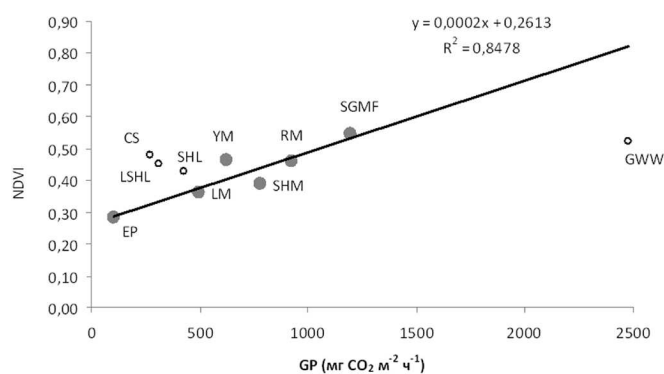


Рис. 1. Связь индекса NDVI и первичной продукции фитоценозов (GPP). Условные обозначения растительных сообществ участка: 1 – кустарничково-лишайниковые (low shrub lichen tundra, LSHL), 2 – кустарничково-лишайниковые (shrub lichen tundra, SHL), 3 – кустарничково-моховые (low shrub moss tundra, SHM), 4 – эродированные торфяники (eroded peat, EP), 5 – травяные ивняки (grass willow, GWW), 6 – осоково-моховые (sedge moss fen, SGMF), 7 – пушицево-моховые (cotton grass swamp, CS), 8 – кустарничково-моховые (shrub mossy tundra, SHM), 9 – лишайниково-моховые (lichen-moss tundra, LM), 10 – ерничково-моховые (yernik moss tundra, YM)

Порядка 60% рассмотренных сообществ описаны установленной линейной зависимостью ($P=0.95$, $N=30$), для остальных сообществ, наблюдаемая интенсивность поглощения CO_2 выше (сообщество GWW) и ниже (LSHL, SHL и CS) 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. 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 могут быть рассмотрены как составленные из комбинаций частей различных типов. Спектрозональные данные отражают преимущественно параметры, формирующиеся донорными частями растений. Для большинства тундровых сообществ, составленных преимущественно однолетними растениями, модель может быть упрощена, и первичная продукция фотосинтеза (NPP) достаточно тесно связана с фотосинтетическим стоком углерода (Ph). Большинство таких сообществ описывается уравнением, представленным на рис. 1.

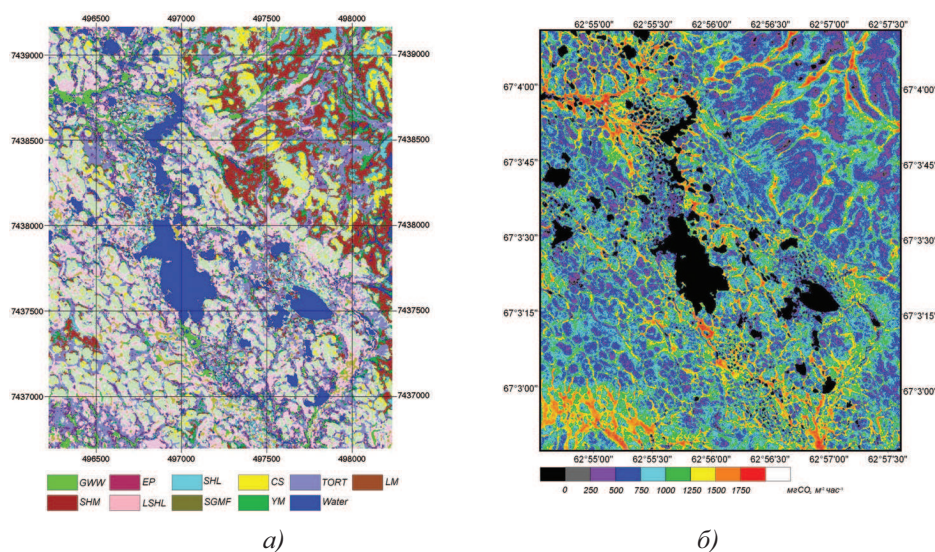


Рис. 2. Фрагмент карты растительности модельного участка, подготовленная на основании обработки сцены QuickBird (а), распределение первичной продукции экосистем тундры на модельном участке (10:56 б.7.2007) полученное на основании построенной модели (б)

Сравнение значений с результатами, полученными нами ранее в районе Воркутинского мерзлотного стационара (Елсаков, 2003) показало, что интенсивность ожидаемого поглощения CO_2 выше наблюдаемого в сообществах с доминированием в фитомассе растений акцепторной части. Так, для сообществ SGMF с менее сомкнутой *C.aquatilis* за вегетационный сезон около 59% углерода 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) и мохового сообществ данные величины составили 74.2 и 87.2%, соответственно. В месте с тем снижается 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 зеленые части сосудистых растений депонируют 5.7 и 17.5% углерода от *NPP*.

Использование выявленной зависимости позволило экстраполировать результаты оценки на прилегающие территории с построением тематической карты распределения первичной продукции (G_p) для доминирующих классов растительного покрова участка востока Большеземельской тундры на основании использования спектральных каналов спутника детального разрешения Quickbird (2.44 м) (рис. 2).

Полученные величины газометрических измерений стали основой для оценки баланса углерода за весь вегетационный период, а их комбинация с выполненной геоботанической картой стала основой для региональной оценки баланса углерода модельного участка. Моделирование сезонного углеродного баланса в изученных сообществах показало, что более сухие сообщества, расположенные на возвышенных формах рельефа (кустарничково-моховые и кустарничково-лишайниково-моховые) являются активным источником углерода в районе, средние значения эмиссии составляет 7.5 гС/м^2 ($=75 \text{ т С/км}^2$), в то время как сообщества с избыточным увлажнением (ОМ, ПМ и М) служат стоком углерода от 2.2 г до $35 \text{ гС/м}^2\text{год}$ (22 и 350 т С на км^2).

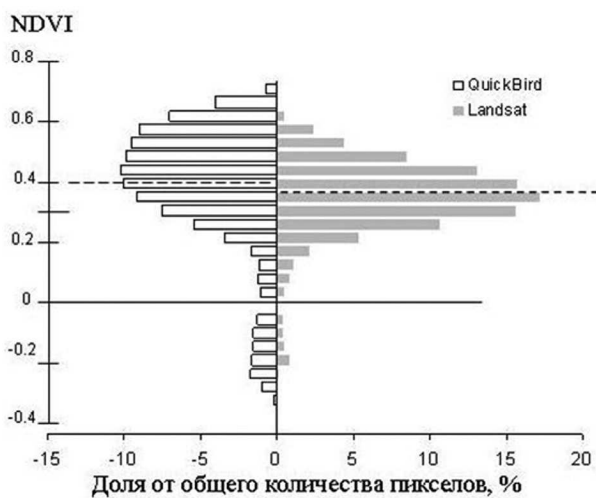


Рис. 3. Распределение значений классов NDVI для сцены Landsat и QuickBird для одного периода съемки. Пунктиром показаны средние значения по сцене ($X_{Landsat} = 0.37$; $X_{QuickBird} = 0.40$)

Однако отсутствие данных повторных съемок Quickbird диктует необходимость привлечения для межгодовых и сезонных оценок изменений количественных показателей более доступных, но имеющих более низкое пространственное разрешение сенсоров. Сравнительный анализ распределения величин NDVI на сценах сенсоров QuickBird и Landsat, одного размера (пространственное разрешение приведено к сценам QuickBird) показал, что по всей сцене усредненные величины NDVI статистически сопоставимы (рис. 3), что позволяет

использовать материалы съемки Landsat в общей оценке продуктивности тундровых сообществ, отличающихся высокой степенью мозаичности. Однако, на сцене Landsat нивелируются крайние элементы значений показателей в силу пространственной генерализации, что затрудняет выполнение сравнительного анализа количественных характеристик сообществ, имеющих незначительные площади.

Полученные контура растительности использовали для выбора однородных по составу пикселей на сцене Landsat (пиксел считался однородным по классу, если в его составе 75% пространства пикселя составлял один класс земной поверхности по более высокому разрешению). Анализ сезонных изменений индекса NDVI (рис. 4) показал, что оценка количественных значений и трендов изменения индекса NDVI для доминирующих сообществ по данным Landsat затруднена, в силу ряда причин.

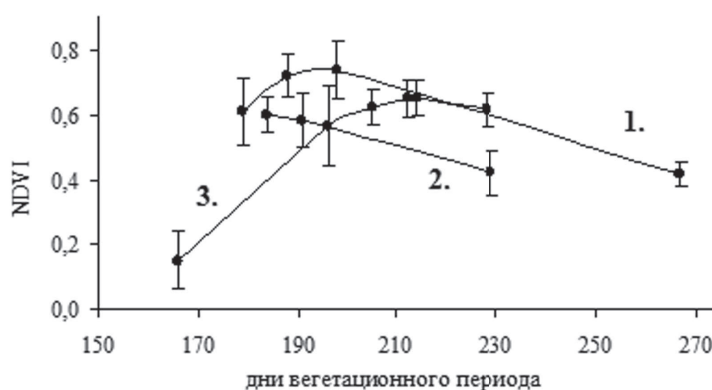


Рис. 4. Пример изменения индекса NDVI в течение вегетационного периода для класса ивняков по данным сенсоров разнотемпературных/разногодных сцен Landsat TM5. Цифрами обозначены: 1 – 2000 г., 2 – 2007 г., 3 – 2009 г.

Во-первых, возможно существенное смещение сроков наступления фенологических событий для лет с различающимися климатическими условиями. Общеизвестна и сезонная динамика содержания пигментов в растениях криолитозоны (Петров и др., 2010). 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 положениями зенитного угла Солнца (Елсаков, Тетерюк, 2011). Данные ограничения могут быть устранены в ближайшее время с вводом в эксплуатацию новых спутниковых систем наблюдения Sentinel-2, развертываемых в рамках развертывания программы GMES (Global Monitoring for Environment and Security) обеспечивающих возможность частых повторных съемок в 2-3 дня.

Общая оценка изменения продуктивности сообществ на региональном уровне была выполнена с привлечением данных многолетнего хода величин индекса NDVI, рассчитанного по данным съемки Terra-MODIS (Елсаков и др., 2011). Анализ межгодовой вариабельности и тренда изменений индекса NDVI показал, что изменение показателей продуктивности растительных сообществ территории имеет территориально неоднородную структуру, и для отдельных участков увеличение аккумуляции углерода в биомассе достигает 7–30 кгС/га в год. Участки изменений локализованы в пределах различных растительных сообществ, преимущественно связаны с развитием ивняков на территориально сопряженных участках в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Сопоставление полученных результатов с ранее выполненными наблюдениями за изменениями криогенных ландшафтов территории (Елсаков, Марущак, 2011) позволяют связать рост продуктивности фитоценозов на отдельных участках с увеличением

глубины протаивания сезонно-талого слоя, ростом температуры верхней кровли многолетне-мерзлых пород, отмечаемым в последние десятилетия (Природная..., 2005).

Полученные результаты демонстрируют наличие трендов изменения фитоценозов региона, связанных с потеплением климата, используя показатель изменения продуктивности фитоценозов. Как косвенный признак установлены участки, испытывающие существенные перестройки в связи с изменением криогенных условий, что делает необходимым их дополнительное исследование на предмет безопасной эксплуатации инженерных и транспортных сооружений, демонстрирует необходимость пересмотра существующих проектов пастбищного устройства для отдельных оленеводческих хозяйств, расположенных в данных районах.

В результате выполненной работы сформулированы следующие выводы:

1. Спектрональные данные спутниковых изображений тесно коррелируют с величинами фотосинтетического потока CO_2 в тундровых экосистемах, оцененных с применением газометрических методов исследований.
2. Снижение пространственного разрешения изображений в целом не оказывает существенных влияний на усредненные величины, однако нивелирует крайние элементы ряда полученных значений пикселей.
3. Сравнительный анализ количественных характеристик, полученных по одномоментным разносезонным и межгодовым изображениям, демонстрирует существенную вариабельность значений показателя, связанную как с фенологическими расхождениями вегетационных сезонов разных лет, так и условиями съемки.
4. Использование временных серий среднего разрешения позволяет провести статистически обоснованную оценку тренда изменений продуктивности фитоценозов за период последних десятилетий, выявить участки трансформированные под влиянием естественных климатических изменений (флуктуаций) и количественно оценить тренды изменений.
5. Полученные результаты позволяют выделить территории, подвергнувшиеся наибольшим изменениям в связи с перестройкой криогенных ландшафтов.

Работа выполнена в рамках программы научных исследований УрО РАН «Реакция экосистем криолитозоны Европейского Севера и Западной Сибири на климатические флуктуации последних десятилетий» (12-С-4-1018).

Литература

1. Воронин П.Ю. Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода Северной Евразии // Физиология растений, 2006. Т.53, №5. С. 777–785.
2. Елсаков В.В. Аккумуляция азота и углерода надземной массой растений в сообществах Большеземельской тундры. – Сыктывкар, 2003. – 28 с. (Научные доклады / Коми научный центр УрО РАН; Вып. 461).
3. Елсаков В.В., Щанов В.М. Особенности спектральных характеристик приморских лугов восточного побережья Малоземельской тундры // Биоразнообразии наземных и водных экосистем охраняемых территорий Малоземельской тундры и прилегающих районов. – Сыктывкар, 2005. (Труды Коми научного центра УрО РАН; №178) С. 148–159.
4. Елсаков В.В., Маруцак И.О. Межгодовые изменения термокарстовых озер Северо-востока Европейской России // Исследование Земли из космоса. 2011. №5. С. 45–57.
5. Елсаков В.В., Щанов В.М., Беляева Н.В. Спутниковые методы исследований в мониторинге и картировании пастбищных угодий северного оленя // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т8. №2. С. 201–207.
6. Елсаков В.В., Тетерюк Л.В. Спутниковые изображения в изучении влияния рельефа на формирование флористического своеобразия фитоценозов карстовых ландшафтов европейского северо-востока России // Исследование Земли из космоса. 2012. №2. [Принято к печати]

7. Карелин Д.В., Иващенко А.И., Замолодчиков Д.Г. Геоинформационный подход в изучении сезонной динамики наземной фитомассы арктических систем: мода или необходимость? // Журн. общей биологии, 1996. – №5. – С. 608–627.
8. Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. 2. Нетто-первичная продукция экосистем / А.З. Швиденко., С.Нильссон, В.С. Столбовой и др. // Экология, 2001. – №2. – С. 83–90.
9. Природная среда в условиях открытой разработки угля (на примере Юньягинского месторождения) / под общей редакцией М.В. Гецен. – Сыктывкар, 2005. – 246 с.
10. Alm J., Schulman L., Walden J., Nykänen H., Martikainen P.J., Silvola J. Carbon balance of a boreal bog during a year with an exceptionally dry summer // Ecology, 1999b. T.80. P. 26–39.
11. Bubier J.L., Crill P.M., Moore T.R., Savage K., Varner R.K. Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland complex // Global Biogeochemical Cycles, 1998. T.12. P. 703–714.
12. Carrol P., Crill P.M. Carbon balance of a temperate poor fen // Global Biogeochemical Cycles, 1997. T.11. P. 349–356.
13. Epstein H.E., Walker D.A., Reynolds M.K., Kelley A.M., Jia G.J., Ping C.L., Michaelson G.J. 2009. Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra. Abstract GC31A-0697, presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, December 14–18. 90:GC31A-0697.
14. Gorham E. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // Ecological Applications, 1991. T.1. P.182–195.
15. Heikkinen J.E.P., Elsakov V.V., Martikainen P.J. Carbon dioxide and methane dynamics and annual carbon balance in tundra wetland in NE Europe, Russia // Global biogeochemical cycles, 2002. V.16, №4. P. 62.1–62.15.
16. Huemmrich 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 // Remote Sensing of Environment. 114. 2010. P. 481–489.
17. Inga P. La Puma, Thomas E. Philippi, Steven F. Oberbauer Relating NDVI to ecosystem CO₂ exchange patterns in response to season length and soil warming manipulations in arctic Alaska // Remote Sensing of Environment, Volume 109, Issue 2, 30 July 2007, P. 225–236.
18. Johnson P.L., Kelley J.J. Dynamics of carbon dioxide and productivity in an arctic biosphere // Ecology, 1970. 51 (1), P. 73–80.
19. Reynolds, M.K., Walker, D.A., Maier, H.A. 2006. NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic. Remote Sensing of Environment. 102:271–281.
20. Waddington J.M., Roulet N.T. Carbon balance of a boreal patterned peatland // Global Change Biology, 2000. T.6. P. 87–97.
21. Walker, D.A., Epstein, H.E., Jia, J.G., Balser, A.W., Copass, C., Edwards, E.J., Gould, W.A., Hollin 2003. Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic. Journal of Geophysical Research-Atmospheres. 108:(d2):8169
22. Wookey P.A. The earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change // Encyclopedia of global environmental change, 2002. P. 593–602.
23. Zamolodchikov D.G., Karelin D.V. An empirical model of carbon fluxes in Russian tundra // Global Change Biology, 2001. T.7. P. 147–161.

The remote sensing data in European North productivity estimation

V.V. Elsakov

*Institute of Biology Komi SC UrD RAS
167610 Syktyvkar, Kommunisticheskaja, 28
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru*

The publication is oriented to investigation of spatial-temporal features of productivity ecosystems of European North with remote sensing and CO₂ gas-exchange methods complex. The model of photosynthetic accumulation of carbon in tundra vegetation communities with optical sensor data analysis was developed. The time-series images demonstrate possibility of analysis of communities' productivity trends estimation under climatic fluctuation of last years.

Keywords: ecosystem productivity, tundra vegetation, CO₂- gas exchange, spectrazonal satellite images.