

РАЗВИТИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ПРИ КОМПЛЕКСНЫХ ЛАНДШАФТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЭКОСИСТЕМ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

В.В. Елсаков, В.М. Щанов

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

В основу проведения работ легли данные дистанционного мониторинга земной поверхности выполненные со спутника Landsat для разных лет съемки и подспутниковые исследования побережья Печорской губы. Специфичность яркостных характеристик позволяет проводить картирование прибрежно-водных заболоченных и тундровых сообществ с учетом изменения их площадей. На основании использования спектральных индексов NDVI и Clay minerals выявлены особенности пространственного распределения и изменений запаса биомассы и распределение субстратов с разным механическим составом. Составление комбинированных изображений (RGB) с присвоением отдельным цветовым компонентам значений индексов, характеризующих отдельные даты наблюдений, позволяет выделять классы земной поверхности, отличающихся сроками превалярования индексов.

Введение

В настоящее время данные дистанционного зондирования (ДДЗ) являются наиболее важными информационными источниками, используемыми при характеристике пространственно-временных закономерностей распределения структурных и функциональных параметров естественных и нарушенных антропогенной деятельностью природных экосистем. Особенно актуально их использование в сочетании с методами комплексной ординации (МКО), развитыми в рамках топологических подходов. Данные методы позволяют систематизировать и количественно оценивать связь между отдельными компонентами, обеспечивать выявление особенностей природных сочетаний как систем, изменяющихся в пространстве. ДДЗ становятся важными источниками применительно целей картирования и составления фациальных (ландшафтных) геоморфологических и геоботанических карт модельных участков с возможностью оценки количественных параметров отдельных компонентов. Получаемые на их основе картографические материалы представляют собой «емкую графическую форму информации о репрезентативном участке исследуемой территории» [1].

Цель настоящей работы состояла в изучении возможностей использования ДДЗ в сочетании с натурными топологическими исследованиями естественных экосистем, представленных галофитными лугами с использованием ДДЗ. Исходные материалы представлены данными высокого разрешения (Landsat ETM+), топографическими материалами и данными полевых исследований.

Приморские луга (марши, лайды) побережья Печорской губы – участки земной поверхности с комплексами монодоминантных растительных сообществ, составленных галофитными видами растений [2,3]. Увеличение площади таких участков происходит за счет выносимых речными системами мелких механических частиц (пылеватых частиц и ила). Средняя многолетняя величина стока наносов в устье р.Печора составляет 8.5 млн т/год, причем на период половодья приходится 90% стока наносов [4]. Наносы тонкодисперсного материала часто покрывают более ранние песчаные отложения, образуя двучленные субстраты. Состав и распределение растительности на таких выположенных поверхностях, часто подвергаемых затоплению, определяются частотой затопления, приливными явлениями, солевым режимом и «выпасом» травоядных птиц. Высокая продуктивность сообществ и доступность корма определяют ценность территории в период линьки и миграций (как места остановок) для гнездовья многих гусеобразных. В то же время уникальность таких сообществ состоит в обилии редких видов растений, имеющих различный статус охраны на региональном и федеральном уровнях: *Puccinellia phryganodes*, *Ranunculus pallasii*, *Rhodiola rosea*.

В целях исследования состояния отдельных компонентов природно-территориальных комплексов в данной работе используются методы дистанционного мониторинга, основанные на анализе закономерностей изменчивости спектральных характеристик растительного покрова и типов подстилающей поверхности. Полевая верификация данных была выполнена в рамках проекта PRIZM в период с 25 июля по 19 августа 2003 г. на территории заповедника в районе п.Ходовариха. В пределах участка приморской лайды были заложены 3 трансекты, ориентированные от побережья в северо-западном, северном и северо-восточном направлениях, протяженностью 0.49, 0.92 и 0.35 км соответственно. Для геоботанических разностей в пределах трансект фиксировали видовой состав, запас

надземной биомассы растений, качественный состав субстрата (гранулометрический анализ проб в пределах 10 см глубины проведен в лаборатории Экоаналит Института биологии Коми НЦ УрО РАН), уровень залегания грунтовых и поверхностных вод и значения электропроводности. Высоту уровня земной поверхности определяли оптическим нивелиром ЗНЗКЛ, при этом уровень зеркала воды в приливно-отливной зоне в период максимального отлива был принят за начало отсчета.

Данные были пространственно позиционированы с использованием приемника GPS GARMIN 12. Особенности спектральных характеристик участков модельных трансект, представленные на снимках ИСЗ Landsat ETM+, приурочены к тем же срокам вегетационного сезона, что и полевые исследования (1988.8.08) и разновременным изображениям (1985.09.09, 1996.05.07). Данные аппаратуры TM+ были нормализованы и представлены в виде стандартных уровней квантования от 1 до 256. Для пикселей трансект были рассчитаны значения индексов:

нормализованного вегетационного индекса (NDVI):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1),$$

где NIR – значение отражения в ближней инфракрасной области спектра (значение 4 канала, λ от 0.75 до 0.90 мкм), RED – отражение в красной области спектра (3 канал, λ от 0.63 до 0.69 мкм). Выбор данного индекса объяснялся тем, что полученные результаты дают сравнимые значения для разных типов съемочной аппаратуры, в то время как использование других индексов, например VI, можно сравнивать только по снимкам с одного сенсора [5];

$$\text{и Clay minerals} = 5/7 \quad (2),$$

где 5 и 7 - значения яркостных характеристик 5-го и 7-го каналов соответственно.

Для пространственной коррекции данных полевых измерений и космоснимков использовали единую топографическую основу, скорректированную относительно крупных водотоков и водоемов (Erdas Imagine 8.5). Топографическую привязку трансект проводили по водоемам, береговой линии и границам песчаных обнажений.

Основные результаты

На основании натурных исследований в пределах территории выделено порядка 20 классов растительных сообществ, различающихся субстратной приуроченностью, отношением к приливно-отливным явлениям и положением в рельефе. С увеличением дистанции от береговой линии наблюдается снижение влияния приливно-отливных явлений, понижаются значения электропроводности поверхностных и грунтовых вод (рис.1), отмечен рост уровня поверхности и снижение участия галофитных сообществ. Состав растительных группировок участков приморских лайд был сходен с ранее изученными нами сообществами района Колоколковой губы – окрестности п.Тобседа [6]. Особенности спектральных характеристик отдельных каналов изображения плотно связаны с составом растительных сообществ и мезорельефом территории (табл. 1.).

Для детального анализа выявляли связь между особенностями подстилающей поверхности земли для участков трансект и спектральными характеристиками каналов (рис. 2). Наиболее молодые по происхождению участки, расположенные в непосредственной близости от вод Кузнецкой губы, составлены изреженной *Puccinellia phryganodes*, произрастающей на илистых отложениях (рис. 1). Более удаленные группировки с примесью *Carex subspathacea* отмечены в непосредственной близости от многочисленных соединенных с губой озер. Рост высоты поверхности сопровождается появлением в составе монодоминантных сообществ примесей *Stellaria humifusa* и *Potentilla egedii*. Данные сообщества в пределах большей части испытывают кратковременные затопления солеными водами и отнесены к приморским лугам низкого уровня. На участках второй и третьей трансект были отмечены только выше обозначенные сообщества, что свидетельствует об их относительно молодом возрасте.

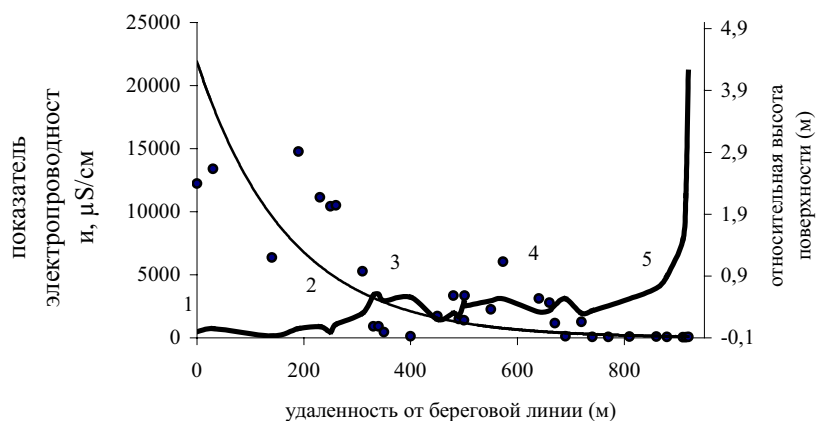


Рис. 1. Зависимость распределения доминирующих групп растительных сообществ (1-6), от уровня поверхности и значений электропроводности в пределах трансекты I.

Цифрами обозначены группы сообществ: 1 – разреженные сообщества *Puccinellia phryganodes*, 2 – приморские луга среднего уровня, 3 – луга высокого уровня, 4 - осоково-сфагновые и пушицево-сфагновые сообщества, 5 - осоково-ивово (*Salix reptans*)-моховые, 6 – сообщества песчаных обнажений.

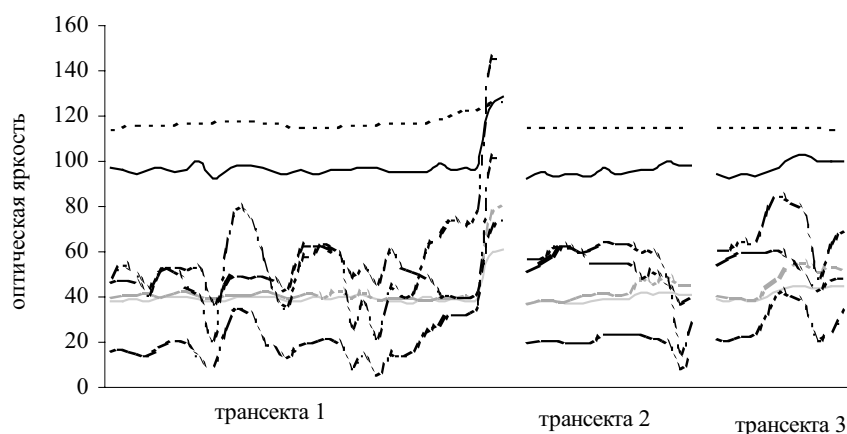


Рис. 2. Особенности яркостных характеристик отдельных каналов аппаратуры ETM+ (1-7 каналы) на модельных трансектах.

Таблица 1. Особенности яркостных характеристик некоторых доминирующих экосистем (спутник Landsat 7, радиометр ETM+).

спектральные каналы снимка	диапазон, мкм	Оптическая яркость*			
		галофитные пресноводные луга (n=256)	сообщества осоки водной (n=725)	кустарничково-лишайниковая тундра (n=450)	заболоченные участки (пушицево-сфагновые сообщества (n=120))
1	0.45-0.515	55.8÷56.3	88.9÷89.2	91.4÷91.8	98.2÷98.9
2	0.525-0.605	23.5÷23.9	34.5÷34.7	35.7÷35.9	38.9÷39.3
3	0.63-0.69	26.6÷27.0	33.6÷33.7	37.8÷38.2	41.8÷42.4
4	0.75-0.9	34.1÷34.8	58.4÷58.8	48.8÷49.4	40.7÷41.6
5	1.55-1.75	55.8÷56.9	56.7÷57.3	81.0÷81.6	74.0÷76.3
6	10.4-12.5	108.8÷109.0	117.3÷117.5	124.3÷124.7	118.2÷118.6
7	2.09-2.35	24.2÷24.9	19.0÷19.3	32.9÷33.2	32.4÷33.8

*Диапазон значений оптической яркости представлен как доверительный интервал для среднего при $p = 0.05$.

Для третьей трансекты дальнейший рост уровня поверхности сопровождается снижением степени минерализации грунтовых вод, вследствие удаленности от береговой линии, меньшего влияния приливных явлений (в виде сизигийных приливов) и появлением мохообразных (*Drepanocladus* sp.). На участках с высоким уровнем минерализации отмечены *S. mackenziei*, *Triglochin palustre*. К более дренированным участкам повышений, приурочены комплексы сообществ, составленные *Dupontia psilosantha*, *Arctanthemum hultenii*. Глубина залегания грунтовых вод на таких площадках варьирует в пределах 15-30 см, отмечено начало дернового процесса. Данные участки отнесены к лугам среднего уровня.

На участках, не подверженных влиянию приливных вод отмечено развитие *Festuca richardsonii*, *Parnassia palustris*, *Salix reptans*, *Rhodiola rosea*. Перечисленные сообщества выделены в группу лугов высокого уровня и расположены на первой приморской террасе.

Последующие участки характеризуются высоким уровнем заозеренности, в них поступают поверхностные и грунтовые стоки дождевых и талых вод от территории вышерасположенной по рельефу, наблюдается формирование элювиально-аккумулятивных комплексов, представленных осоково-сфагновыми и пушицево-сфагновыми сообществами. Дальнейшее повышение уровня поверхности сопровождается сменой сообществ на осоково-ивово (*Salix reptans*) моховые и переходом к псаммофитным группам сообществ песчаных обнажений.

Анализ коррелятивной связи значений спектральной яркости для пикселей выделенных трансект показывает высокую значимую связь для значений 1,2 и 3 каналов, 5 и 7 каналов. В меньшей степени с остальными каналами связаны значения 4 и 6 каналов.

С целью выявления особенностей пространственного распределения запасов биомассы и ее динамики в течение вегетационного периода был проведен расчет индекса NDVI для всех пикселей изображения района исследований (рис.3). Анализ связи запасов биомассы в отдельных сообществах со значениями индекса NDVI обнаруживает положительную статистически значимую корреляцию (рис. 4). В пределах рассмотренной территории значения индекса варьировали от -0.48 до 0.50. Наименьшими значениями характеризовались водные поверхности и песчаные субстраты, лишенные растительного покрова (значения не превышали 0.05). Наибольшие отмечены для осоково-моховых сообществ (более 0.23). Составление комбинированных изображений (RGB) с присвоением отдельным цветовым компонентам значений NDVI разных сезонов позволяет выделить пять классов земной поверхности, отличающихся сроками преваляирования индекса, что связано с различиями в развития биомассы отдельных компонентов фитоценозов:

1 – участки с преобладанием индекса в начальные сроки вегетации (разреженные псаммофитные сообщества, автоморфные тундровые формации);

2 – поверхности с преобладанием индекса NDVI в середине вегетационного периода (прибрежно-водные сообщества пресноводных водоемов);

3 – территории с преобладанием значений в середине и конце вегетационного периода (приморские луга низкого и среднего уровней);

4 – фрагменты с преобладанием значений показателя в начале и середине вегетационного периода (приморские луга высокого уровня и осоково-ивово (*Salix reptans*)-моховые сообщества);

5 – территории, сохраняющие высокие значения индекса в пределах одного уровня на протяжении всего вегетационного периода (заболоченные осоково (*C.aquatilis*) моховые сообщества). Выделение данных территорий может быть использовано для предварительной оценки сезонной динамики биомассы и выявления сообществ, которые могут использоваться в качестве пастбищных участков в разные сроки вегетационного периода.

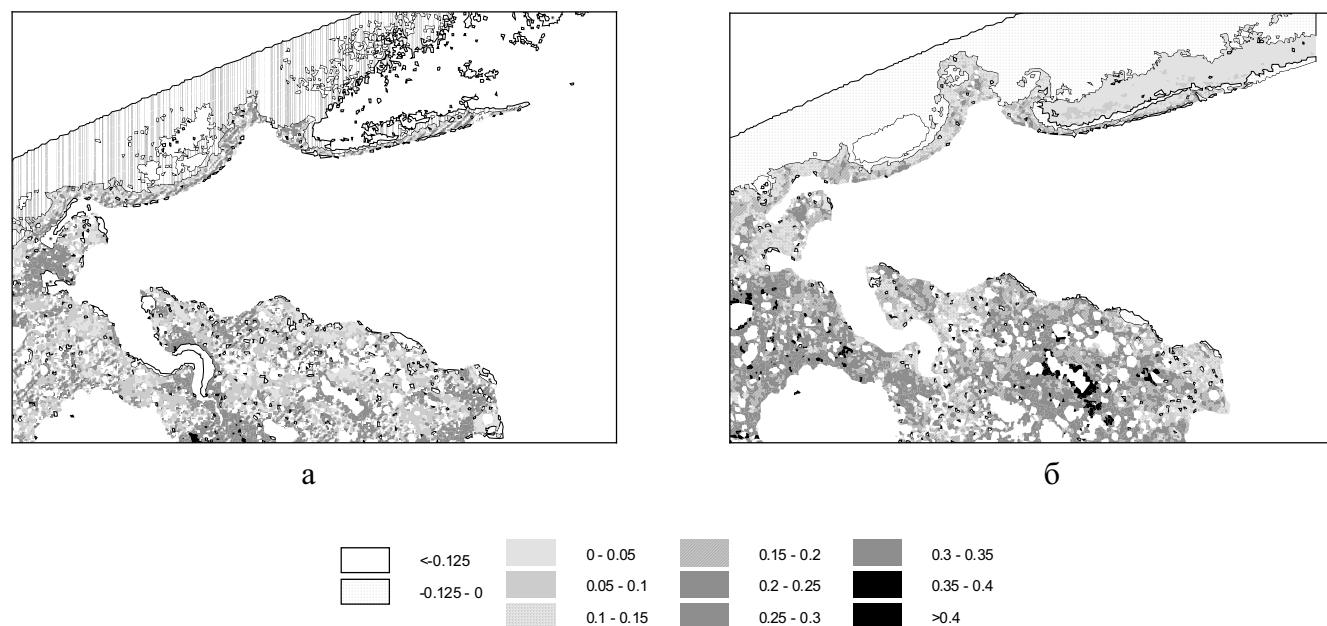


Рис. 3. Оценка динамики запасов биомассы на основании расчетов индекса NDVI а – 09.09.1985, б – 05.07.1996

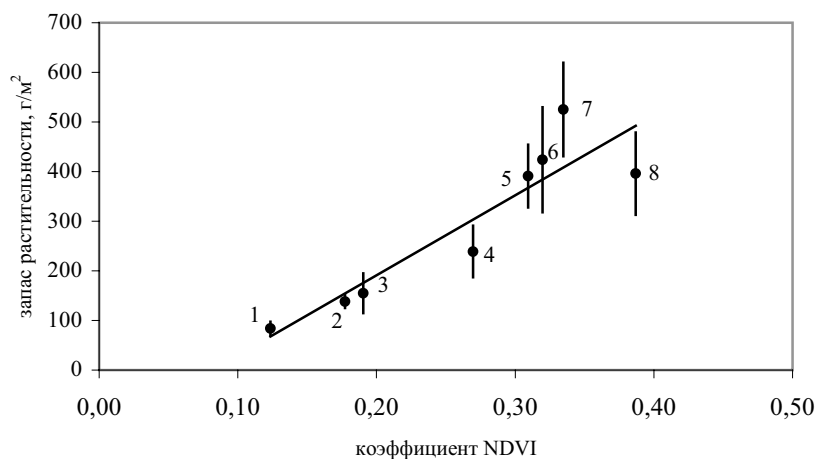


Рис. 4. Средние значения запасов биомассы травянистых растений и индекса NDVI на участках засоленных и пресноводных лугов. Уравнение регрессии: $y = 1612.5x - 131.6$; $r = 0.91$; $n = 8$; $p < 0.001$. Числами обозначены отдельные участки работ.

На выделенных трансектах наблюдали пространственные изменения гранулометрического состава верхних почвенных горизонтов (0-10см) в зависимости от удаления от береговой линии (рис.5). Тесные коррелятивные зависимости между значениями индекса Clay minerals и гранулометрическим составом верхнего слоя субстрата выявлены для участков с отсутствующим или разреженным растительным покровом. Для улучшения результатов сопоставления разновременных снимков проводили дополнительную нормализацию индекса, при этом значения варьировали от -0.16 до 0.72. Для мелкодисперсного материала (пылевые и иловатые частицы) значения показателя варьировали в пределах 0.4-0.45.

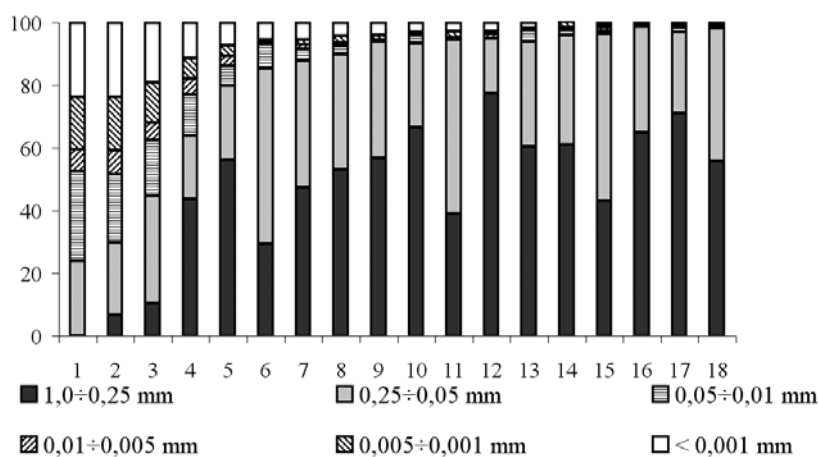
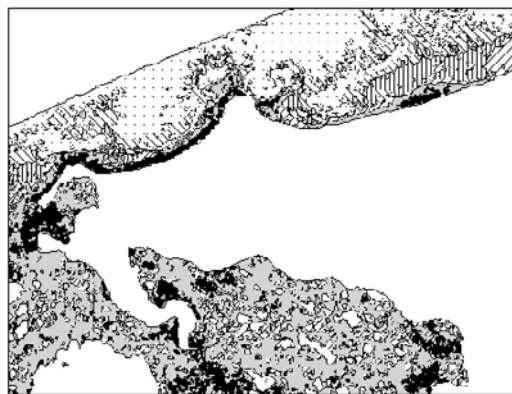


Рис. 5. Анализ гранулометрического состава почвенных образцов в направлении увеличения расстояния от береговой линии трансекты №1 (%).

Пространственный анализ распределения индекса Clay minerals позволил выявить участки, различающиеся по фракционному составу субстрата. Для тундровых формаций с ненарушенным растительным покровом значения индекса существенно не варьировали и преимущественно были расположены в пределах 0.35-0.4. Несмотря на то, что основная тенденция современных естественных процессов района связана с заиливанием Печорской губы [4], на изображениях 1985-1996 гг. видимых изменений формы береговой линии не выявлено, что свидетельствует о незначительных флуктуациях уровня моря. Перемещение мелкодисперсных фракций вглубь территории подтверждает высокую рельефообразующую роль волновых (штормовые нагоны) явлений, изменение форм контуров песчаных субстратов – интенсивное проявление эоловых процессов, и изменение степени увлажнения субстратов в связи с сезонными различиями.

Сопоставление серии изображений разных лет обнаруживает существенные изменения береговых линий и площадей поверхности отдельных озер территории. Использование спектральных характеристик прибрежно-водной растительности позволяет провести предварительную классификацию озер по градиенту солености.



а



б

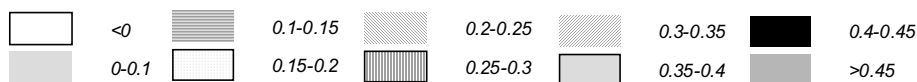


Рис. 6. Изменение значений Clay minerals модельной территории а – 09.09.1985, б – 05.07.1996

Заключение

Таким образом, полученные результаты подчеркивают необходимость подготовки и использования серий изображений отдельных участков ООПТ с целью проведения статистически корректного анализа временных (годовых и сезонных) и территориальных изменений компонентов природных комплексов, демонстрируют возможности перехода от уровня качественного анализа данных дистанционного зондирования к количественному анализу показателей с проведением натурной верификации.

Литература

1. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Наука: Новосибирск, 1978. 318с.
2. Корчагин А.А. Растительность морских аллювиев Мезенского залива и Чешской губы (луга и луговые болота). Ленинград, 1934. С.223-332.
3. Лесков А.И. Геоботанический очерк приморских лугов Малоземельского побережья Баренцова моря // Ботан. журн. 1936. Т. 21. № 1. С.96-116.
4. Печорское море. Системные исследования. М.: «Море». 2003. 502с.
5. Щербенко Е.В., Шорохова М., Дронин Н., Скабелкин Ю.А. Обнаружение засухи по данным космических съемок // Arcreview Современные геоинформационные технологии. № 2. 29. С.8-9.
6. Graaf J., Lavrinenko O.V., Elsakov V.V., Eerden M.R., Stahl. J. Habitat use of barnacle geese at a subarctic salt marsh in the Kolokolkova Bay, Russia // Polar Biol., 2004. - №27. – 3.651-660.