

## Дистанционный мониторинг растительности маршей побережья Баренцева моря

И. А. Лавриненко

*Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН,  
197376 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 2  
E-mail: lavrinenkoi@mail.ru*

Анализ спутниковых снимков показал, что площадь маршей, покрытых галофитной растительностью, на побережье Колокольной губы Баренцева моря и средние значения показателя NDVI, рассчитанные на эту площадь, в период с 1973 по 2011 гг. характеризовались значительным варьированием межгодовых величин. До 2010 г. площадь варьировала в пределах 357–636 га, среднее значение NDVI изменялось в пределах 0.13–0.32. После сильного шторма 24–25 июля 2010 г., сопровождающегося нагоном воды, площадь растительности на маршах сократилась до 43 га, значения NDVI снизились до 0.10, на следующий год составили 50 га и 0.03, соответственно. Анализ спутниковых снимков на остальных участках маршей побережья Баренцева моря в пределах тундровой зоны не выявил подобного масштабного нарушения экосистем.

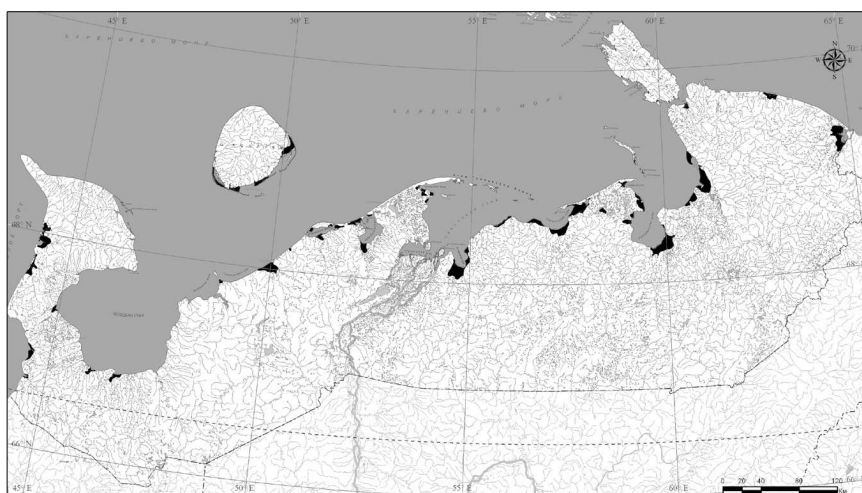
**Ключевые слова:** побережье Баренцева моря, марши, динамика растительности, NDVI.

Процесс трансформации береговой линии арктических морей, вследствие климатических изменений и активизации штормовых явлений, находится в центре внимания учёных в связи с планируемым освоением арктического шельфа (Васильев, 2006; Григорьев и др., 2006, 2009; Сергиенко, 2008; Стратегия развития., 2010). К числу наиболее уязвимых и экологически значимых ландшафтов береговой зоны относятся марши – плоские и хорошо увлажненные аккумулятивные ландшафты, формирующиеся под действием приливов, волн и нагонов с отложением рыхлого илистого или песчаного материала, занятые галофитной растительностью (Голуб, Соколов, 1998).

В циркумполярном масштабе марши бассейна Северного Ледовитого океана очень ограничены по площади, но в то же время выполняют важнейшие экосистемные функции. Они являются местом гнездования и кормления многих травоядных водоплавающих птиц, в частности белошёркой казарки, белолобых гусей, гуменников, малого лебедя, а также многочисленных куликов.

В то же время, в силу местоположения (наиболее низменные береговые участки суши) и водного режима (заливание морской водой в приливы), марши являются наиболее уязвимым компонентом приморских экосистем. В случае аварии при нефтяных разработках на шельфе или транспортировке нефти танкерами, именно марши, расположенные в буферной зоне между морем и более возвышенной террасой с тундровой растительностью, испытают на себе последствия нефтяного загрязнения, поскольку сыграют роль ловушек, куда течениями и приливами прибьёт разлившаяся нефть. Виды приморского флористического комплекса, имея узкую экологическую амплитуду, являются наиболее чувствительными к техногенным нарушениям экотопов.

На территории восточно-европейских тундр марши распространены на низменных выположенных прибрежных участках морских заливов и губ, подверженных воздействию приливов, в мелководных устьевых частях рек, впадающих в Баренцево и Белое моря, и имеют ограниченное распространение (рис. 1).



Условные обозначения: ■ Приморские марши

Рис. 1. Распространение маршей в восточно-европейских тундрах

Район исследований – полуостров, ограниченный с северо-запада Поморским проливом Баренцева моря, а с юга и востока – Колоколковой губой и ее заливом Камбальничья Паха. Приморские марши развиты со стороны залива Камбальничья Паха и проникают вглубь пещер на 0.8–2.5 км (рис. 2).

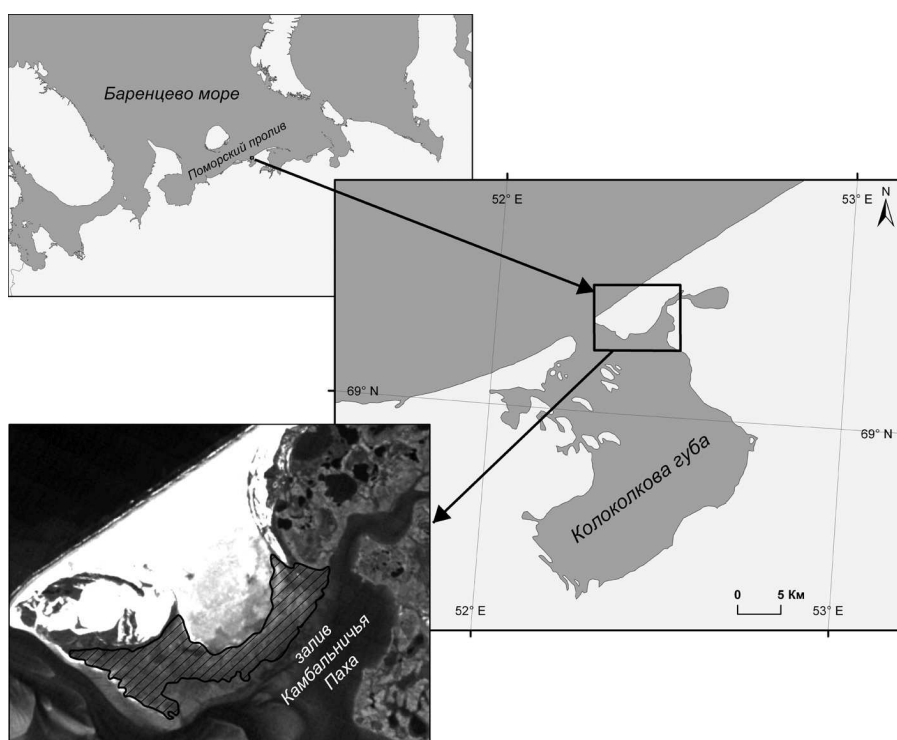


Рис. 2. Картограмма района исследований; на спутниковом снимке Landsat 5 (от 1.08.1987 г.) штриховкой выделены марши, покрытые растительностью

Растительность маршей этого района была изучена ранее в 2002 г. (Матвеева, Лавриненко, 2011). В период полевых работ в июле 2011 г. нами зарегистрирована практически полная гибель растительного покрова. В связи с этим, цель настоящей работы — проанализировать многолетнюю динамику растительности маршей Колоколковой губы с использованием дистанционных методов и выяснить причины ее масштабной деградации.

Для изучения динамики растительного покрова маршей были использованы результаты полевых исследований 2002 и 2011 гг. и материалы многозональных космических снимков спутников Landsat за период с 1973 по 2011 гг., отобранных на сайте <http://glovis.usgs.gov>. При анализе многолетней динамики растительного покрова использовали нормализованный вегетационный индекс (NDVI), отражающий зелёную биомассу и содержание хлорофилла в растениях (Walker et al., 2003). Для получения репрезентативных данных были отобраны снимки, сделанные в июле—августе, когда растительность накапливала максимальную зелёную биомассу.

### Многолетняя динамика растительного покрова маршей

Для тундровой зоны установлена положительная зависимость между показателями NDVI и зелёной фитомассы (Walker et al., 2003; Raynolds et al., 2012).

В период с 1973 по 2009 гг., как видно из рис. 3 и 4, площадь покрытых растительностью маршей и средние значения показателя NDVI, рассчитанные на эту площадь, характеризовались значительным межгодовым варьированием.

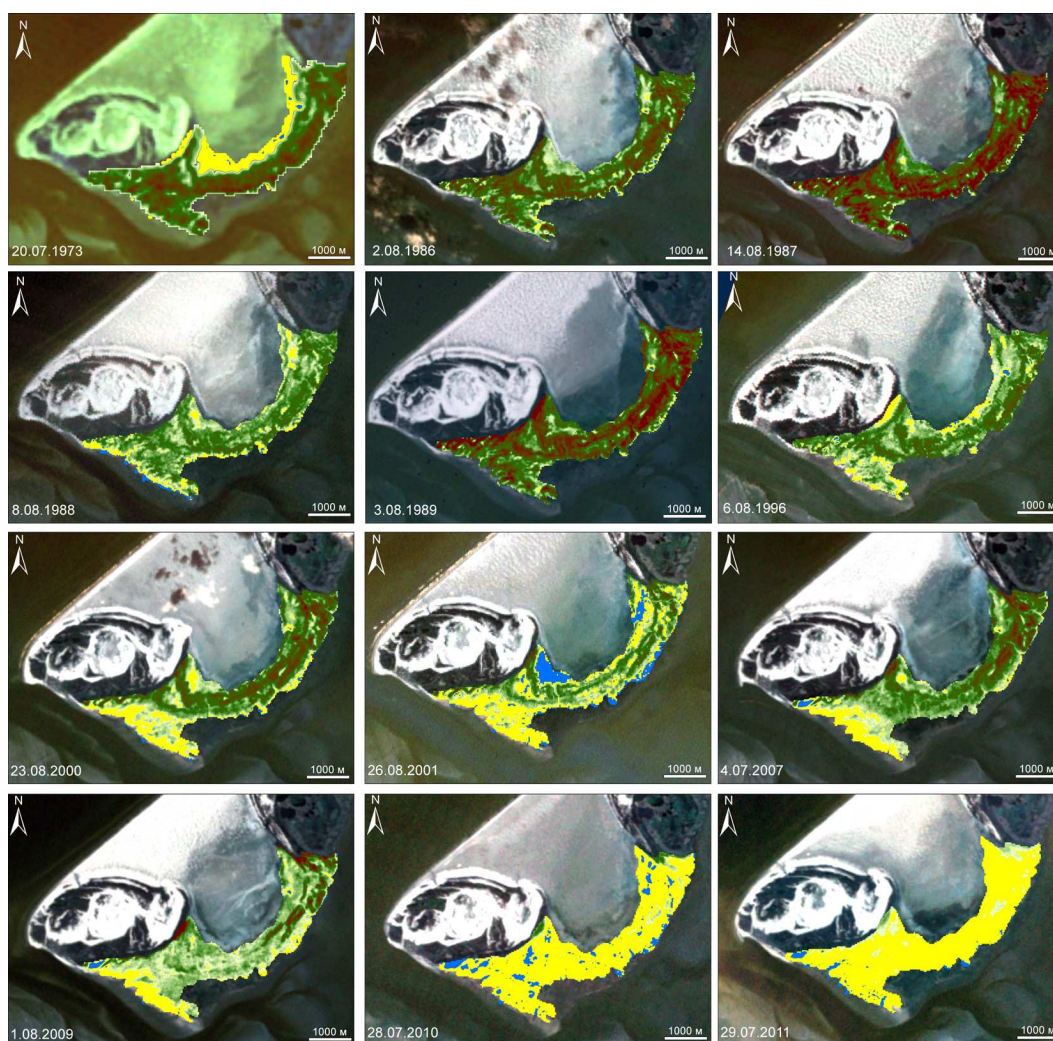
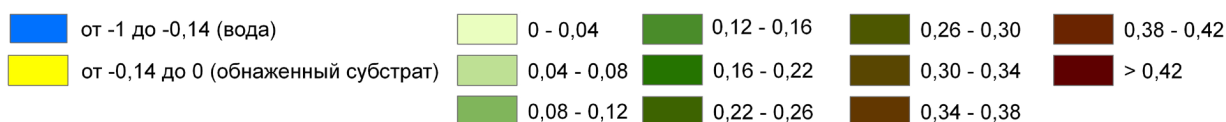


Рис. 3. Многолетняя динамика вегетационного индекса (NDVI) на маршах.  
Значения показателей индекса NDVI:



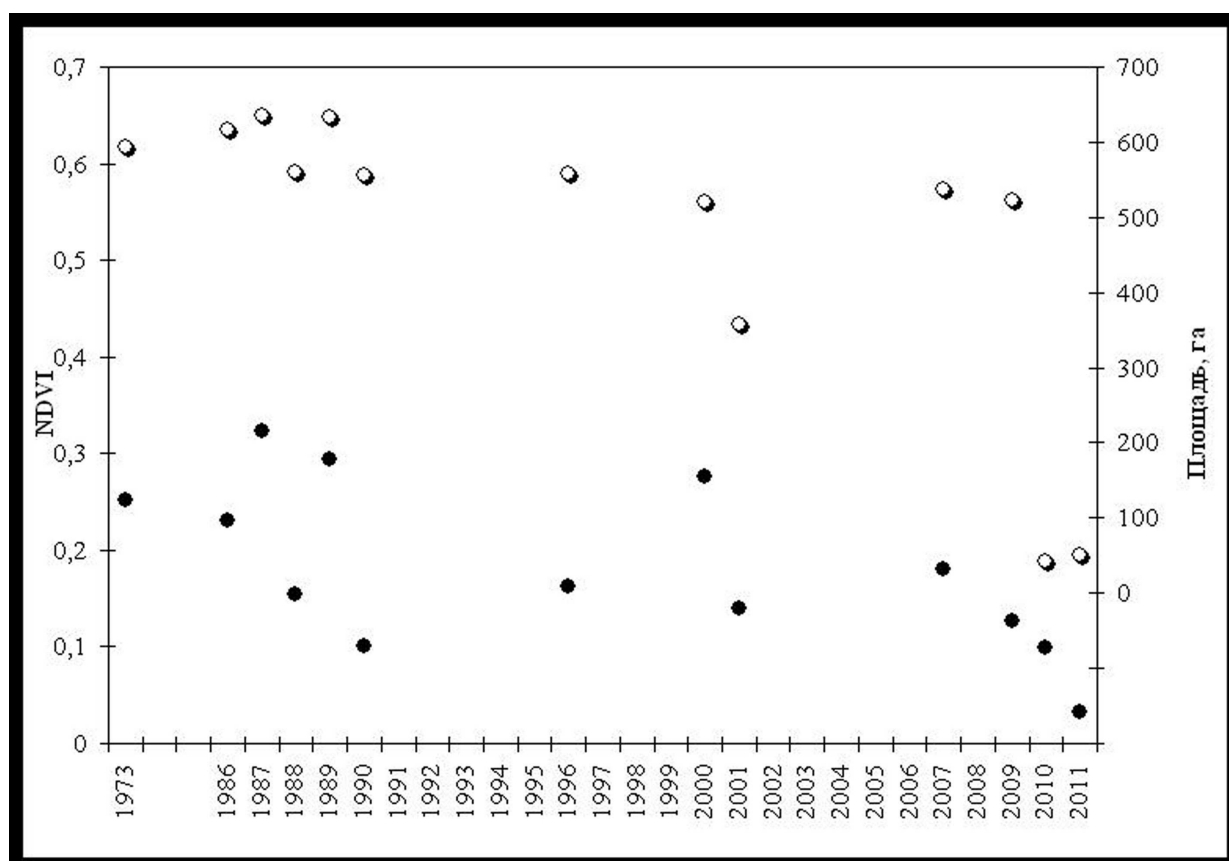


Рис. 4. Средние значения индекса NDVI на маршах побережья Колоколковой губы Баренцева моря (чёрные кружки) и площадь маршей, занятая растительностью (белые кружки), в динамике

В 1973 г. марши вдоль берега залива Камбальничья Паха Колоколковой губы были сформированы более узкой полосой, чем в последующие 80-е годы. Площадь маршей, покрытых растительностью (значения NDVI больше 0), составляла 595 га, среднее значение вегетационного индекса — 0.25.

В 1986, 1987 и 1989 гг. площадь маршей с растительностью была наибольшей (616—636 га). В эти годы также достаточно высокими были средние значения вегетационного индекса, рассчитанные для начала-середины августа (0.23—0.32). Из этого ряда выпадает 1988 г., когда на маршах, по-видимому, произошли события, которые привели к снижению показателя NDVI (в начале августа средние значения составили 0.15) и некоторому сокращению площади, покрытой растительностью, до 560 га.

В период с 1996 по 2009 гг. на спутниковых снимках отчетливо регистрировались обширные участки обнажённого субстрата, площадь маршей, покрытых растительностью, в эти годы изменялась в пределах 357—558 га, средние значения NDVI — от 0.13 до 0.28. Резкое уменьшение площади, занятой галофитной растительностью, отмеченное в 2001 г. (357 га), по сравнению с 2000 г. (520 га), позволяет предположить, что это произошло под влиянием каких-то внешних факторов.

Примечательно то, что этот период совпадает с началом массового расселения здесь колонии белошеюй казарки (Литвин и др., 2002—2009; Литвин и др., 2011; van der Graaf et al., 2004; Karagicheva et al., 2011), которая активно использует растительность маршей в качестве кормовой базы. При отсутствии пастбищной нагрузки на сообщества маршей Малоземельского побережья Баренцева моря высота основного кормового вида (*Carex subspathacea*) составляет 12—15 см (Лесков, 1936; собственные данные). В 2002 г. средняя высота покрова в сообществах разных ассоциаций с доминированием этого галофита была от 0.8 до 2.1 см

(van der Graaf et al., 2004). Снижение NDVI, по-видимому, частично обусловлено влиянием травоядных птиц на растительность. Однако сокращение площадей маршей в это период и появление на их месте обширных участков обнаженного песчаного субстрата, по-видимому, обусловлено факторами, отличными от орнитогенных.

В 2010 г. (снимок от 28.07) отмечено резкое сокращение площади маршей, покрытых растительностью, до 43 га и падение вегетационного индекса до 0.10. На всей остальной площади растительный покров был уничтожен, преобладали участки с отрицательными и нулевыми значениями NDVI, соответствующие обнаженному субстрату и воде. В 2011 г. суммарная площадь островков маршей с сохранившейся растительностью составляла менее 10 % от таковой в 1986 г., среднее значение NDVI на них снизилось до 0.03.

Анализ спутниковых снимков позволил установить, что гибель растительности маршей на площади около 600 га произошла в конце июля 2010 г. и совпала с сильным штормом, обрушившимся на побережье Баренцева моря 24—25 июля. Северный ураганный ветер (до 41 м/с) привел к подъёму уровня воды в Колоколковой губе и затоплению маршей на несколько дней (на снимке от 28.07.2010 ещё видны участки под водой). Гибель растительности произошла в основном из-за её погребения под слоем ила, взмученного штормом в Колоколковой губе, и впоследствии, при нагоне, осаждённого поверх маршей. Заиливание растительности и создание анаэробных условий в сырых маршевых почвах сопровождалось микробиологическим и химическим образованием сульфидов железа, которые явились причиной окраски в чёрный цвет верхних слоёв почвы. На почвенных прикопках, выполненных на маршах с погибшей растительностью, видно, что дерновый горизонт погребён под слоем чёрного ила, имеющего запах сероводорода, засыпанного в свою очередь светлым песком. Впоследствии, когда появился доступ кислорода к толще дернины в дренированных маршевых местообитаниях, а также с атмосферными осадками или талыми водами – в слабодренированных, начался процесс окисления сульфидов, сероводорода и промежуточных соединений как химическим, так и микробиологическим (ферробактерии, серобактерии) путём с образованием серной кислоты. По-видимому, токсичность сероводорода, а также резкое подкисление среды явились основными факторами, обусловившими столь масштабную гибель растений после шторма 2010 г. (Лавриненко и др., 2012). Появление на маршах обширных обнажённых участков в некоторые годы (1988, 2001 гг.) (рис. 3), по-видимому, также можно объяснить заиливанием растительности во время штормов и нагонов, с последующим образованием зон сульфидизации.

Анализ спутниковых снимков 2009—2011 гг. на других участках маршей побережья Баренцева и Белого морей в пределах тундровой зоны (рис. 1) не выявил подобной масштабной деградации этих экосистем. Объяснение, возможно, кроется в том, что Колоколкова губа закрыта от моря, соединяется с ним лишь узким (2.8 км шир.) проливом, и здесь накоплено огромное количество ила, выносимого впадающими в неё реками, пересекающими на своем пути глинистые морены. В других заливах и губах, открытых морю, например в Паханчской или Печорской, не происходит накопления столь большого количества тонкодисперсного материала, и во время шторма в июле 2010 г. не произошло значительной седиментации ила на поверхности маршей, обусловившей гибель растительности.

Подобная деградация приморских маршей нуждается в серьезной оценке экологических последствий, прежде всего, для орнитофауны. Точная регистрация времени этого явления дает прекрасные возможности для организации мониторинга с использованием, как полевых работ, так и дистанционных методов, и изучения динамики восстановления уникальных приморских экосистем в Российской Арктике. Планируемое расширение добычи нефти на шельфе Баренцева моря и её транспортировки морским путём, требует крайне сбалансированного подхода, учитывающего не только возможные аварийные ситуации со стороны объектов нефтепромысла, но и происходящие климатические изменения и сопряженные с ними явления, совместное действие которых способно чрезвычайно быстро привести уязвимые приморские экосистемы к экологической катастрофе.

Работа выполнена в рамках контракта с «Wetlands International» «Study of Mitigation, Recovery & Restoration Options for Oil and Gas Industry Impacts on Arctic Wetlands» при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-04-01114-а) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Биологическое разнообразие».

## Литература

1. *Васильев А. А.* (2006) Динамика берегов Карского моря // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. С. 56–67.
2. *Голуб В. Б., Соколов Д. Д.* (1998) Приморская растительность Восточной Европы // Успехи современной биологии. 1998. Т. 118. Вып. 6. С. 728–742.
3. *Григорьев М. Н., Разумов С. О., Куницкий В. В., Спектор В. Б.* (2006) Динамика берегов восточных арктических морей России // Криосфера Земли. 2006. Т. 4. С. 74–95.
4. *Григорьев М. Н., Куницкий В. В., Чжан Р. В., Шепелев В. В.* (2009) Об изменении криологических, ландшафтных и гидрологических условий в Арктической зоне Восточной Сибири в связи с потеплением климата // География и природные ресурсы. 2009. №2. С. 5–11.
5. *Лавриненко И. А., Лавриненко О. В., Добрынин Д. В.* (2012) Многолетняя динамика и гибель растительности маршей Колоколковой губы Баренцева моря // Растительность России. 2012. В печати.
6. *Лесков А. И.* 1936. Геоботанический очерк приморских лугов Малоземельского побережья Баренцева моря // Бот. журн. 1936. Т. 21. №1. С. 96—116.
7. *Литвин К. Е. и др.* (2002–2009). Отчет по условиям размножения. Пос. Тобседа, Колоколкова губа, Россия / Птицы Арктики: программа сбора данных об условиях размножения арктических птиц (On-line база данных). Ред. Соловьев М. Ю., Томкович П. С. Сайт в интернете <http://www.arcticbirds.ru/>.
8. *Литвин К. Е., Покровская О. Б., Анисимов Ю. А., Карагичева Ю. В.* (2011) Динамика численности колоний белошекой казарки (*Branta leucopsis*) в Колоколковой губе / Тез. докл. Междунар. конф. «Гусеобразные Северной Евразии: география, динамика и управление популяциями» 24–29 марта 2011 г. 2011, Элиста. С. 50.
9. *Матвеева Н. В., Лавриненко О. В.* (2011) Растительность маршей северо-востока Малоземельской тундры // Растительность России. 2011. №17–18. С. 45–69.
10. *Сергиенко Л. А.* (2008) Флора и растительность побережий Российской Арктики и сопредельных территорий. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 225 с.
11. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. Проект. (2010) М., 2010. 242 с.
12. *Karagicheva J., Rakhimberdiev E., Dobrynin D., Saveliev A., Rozenfeld S., Pokrovskaya O., Stahl J., Prop J. and Litvin K.* (2011) Individual inter-annual nest-site relocation behaviour drives dynamics of a recently established Barnacle Goose *Branta leucopsis* colony in sub-arctic Russia // Ibis. 2011. V. 153. Issue 3. P. 622–626.
13. *Walker D. A., Epstein H. E., Jia G. J., Balsler A., Copass C., Edwards E. J., Gould W. A., Hollingsworth J., Knudson J., Maier H. A., Moody A., Reynolds M. K.* (2003) Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic // J. of Geophysical Research. 2003. V. 108 No D2, 8169, doi:10.1029/2001JD000986. P. 1–7.
14. *Reynolds M. K., Walker D. A., Epstein H. E., Pinzon J. E., Tucker C. J.* (2012) A new estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and AVHRR NDVI // Remote Sens. Lett. 2012. V. 3. Issue. 5. P. 403–411.
15. *Van der Graaf A. J., Lavrinenko O. V., Elsakov V., van Eerden M. R. and Stahl J.* (2004) Habitat use of barnacle geese at a subarctic salt marsh in the Kolokolkova Bay, Russia // Polar Biology. 2004. V. 27. P. 651–660.