

УДК 528.88

ОЦЕНКА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ОСТРОВА ВАЙГАЧ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Полякова Е.В.

*Институт экологических проблем Севера УрО РАН, Архангельск, e-mail: lenpo26@yandex.ru;
Центр космического мониторинга Арктики Северного Арктического
федерального университета им. М.В. Ломоносова, Архангельск*

Глобальные изменения среднегодовых температур особенно ярко проявляются в северных регионах. Все чаще говорится о «озеленении» Арктики и увеличении продолжительности вегетационного периода. Растительный покров, являясь основным звеном биосферы, находится в тесной связи с физико-географическими и климатическими условиями и выступает в качестве одного из интегрирующих показателей происходящих экосистемных изменений. Для оценки межгодовой изменчивости растительного покрова используют вегетационные индексы. В статье проведена оценка изменения растительного покрова о. Вайгач за 25-летний период с использованием вегетационного индекса NDVI, рассчитанного на основе двух разновременных снимков Landsat-5 (дата съемки 02.08.1988) и Landsat-8 (дата съемки 31.07.2013). Выявляются как положительные значения изменений индекса NDVI, так и отрицательные, причем положительные изменения приурочены к центральной части острова, где развит возвышенный рельеф в виде параллельно протянувшихся гряд высотой до 100–150 м, а отрицательные значения изменений индекса NDVI характерны в большей степени для побережий и пониженных участков острова. Средние значения NDVI для острова составляют 0,3–0,35, что соответствует показателям тундровой растительности. В целом за 25-летний период существенных изменений значений NDVI не выявлено, что свидетельствует о достаточно стабильном состоянии растительного покрова.

Ключевые слова: Арктика, тундровые экосистемы, дистанционное зондирование Земли, Ландсат, вегетационные индексы

ESTIMATION OF THE VEGETATION COVER FOR VAIGACH ISL AND BY REMOTE SENSING DATA IN A CHANGING CLIMATE

Polyakova E.V.

*The Institute of ecological problems of the North UD RAS, Arkhangelsk, e-mail: lenpo26@yandex.ru;
Space Monitoring Center of the Arctic NARFU, Arkhangelsk*

The global average annual temperature change is particularly pronounced in the Northern regions. More and more often referred to «greening» of the Arctic and longer vegetation seasons. The vegetation cover is the main link biocenosis. It is closely related to the physical and geographical and climatic conditions, and stands as one of the integrating indicators of the changes in the ecosystem. Vegetation indices used to assess the interannual variability of the vegetation cover. In the article evaluated the changes of vegetation on the Vaygach for 25-year period using the vegetation index NDVI, calculated on the basis of two multi-temporal images Landsat-5 (survey date 08.02.1988) and Landsat-8 (survey date 31.07.2013). Positive and negative values of changes index NDVI are revealed. Positive changes are confined to the central part of the island, where developed elevated relief in the form of parallel ridges stretching up to 100–150 m. Negative values of index changes characteristic of coasts and lower areas of the island. The average values of NDVI for the island up 0,3–0,35. This corresponds to the performance of tundra vegetation. In general, the 25-year period of significant changes in the values of NDVI have been identified. This indicates a fairly stable vegetation.

Keywords: Arctic, tundra ecosystems, remote sensing, Landsat, NDVI

Глобальные изменения среднегодовых температур особенно ярко проявляются в северных регионах. Оценке состояния природных экосистем высоких широт в условиях изменяющегося климата посвящено большое количество работ и проектов, как в России, так и за рубежом. Все чаще говорится о «озеленении» Арктики (Walker et al, 2012) и увеличении продолжительности вегетационного периода (Slayback et al, 2003; Лавриненко и др., 2004). По одним прогнозам, к 2100 г. около 10% тундровых сообществ будут заменены бореальными (Sitch et al, 2003), по другим – порядка 50% (White et al, 2000; Xu et al, 2013). Согласно

Программе по оценке климатических воздействий в Арктике (АСИА, 2004), очень вероятно, что сдвиг зон вегетации в Арктике вызовет широкомасштабные последствия. Прогнозируется, что растительные зоны сдвинутся к северу, лесная зона распространится в тундру, а тундра продвинется в полярные пустыни.

Для оценки межгодовой изменчивости растительного покрова используют вегетационные индексы. Наиболее популярный и часто используемый вегетационный индекс – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который для растительности принимает положительные значения,

и чем больше зеленая фитомасса, тем он выше. Вычисляется по формуле

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

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED – отражение в красной области спектра.

Изменения в растительных сообществах под влиянием изменения климата показаны, прежде всего, для североамериканского сектора Арктики (Jia et al, 2003; Goetz et al, 2005; Nghiem et al, 2007). Расчет NDVI по разновременным космическим изображениям свидетельствует о возрастании его усредненного значения за последние десятилетия (Could et al, 2009). Как полагают авторы, это связано с увеличением продолжительности вегетационного периода и с документально подтвержденными изменениями содержания CO₂ в атмосфере.

Подобные тенденции динамики растительного покрова под влиянием климатических изменений характерны и для европейского сектора Арктики. В данной статье дана оценка изменчивости растительного покрова о. Вайгач в условиях климатических изменений за 25-летний период (с 1988 по 2013 гг.) на основе расчета индекса NDVI по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Характеристика района исследования

О. Вайгач располагается между холодным Карским морем на востоке и относи-

тельно более тёплым Баренцевым на западе, отделен с юга от континента (Югорского полуострова) узким проливом Югорский Шар и с севера от архипелага Новая Земля проливом Карские Ворота. Административно принадлежит Ненецкому автономному округу (рис. 1). На территории острова Администрацией НАО № 111-п от 29 мая 2007 г. учрежден Государственный региональный комплексный природный заказник «Вайгач».

Согласно геоботаническому районированию о. Вайгач расположен в тундровой области, его большая северная часть относится к подобласти арктических тундр, южная оконечность – к подобласти гипоарктических (субарктических) тундр. Растительность тундровая. В климатическом отношении граница арктических тундр примерно совпадает с изотермой июля +6°С. Климат острова морской арктический. В течение всего года на острове, по средним данным метеостанций (Вайгач, Бухта Варнека и Болванский нос), отмечается неустойчивая погода с преобладанием пасмурных дней – число дней с общей облачностью составляет 156, с нижней – 84. Рельеф острова изменяется от прибрежно-морского равнинного до расчлененного, в виде двух параллельно протянувшихся вдоль центральной части острова гряд высотой до 100–150 м. Преобладающие породы – сланцы, песчаники и известняки. Много термокарстовых, ледниковых и тектонических озёр и болот (Корейша, 2000).



Рис. 1. Местоположение острова Вайгач в составе Ненецкого автономного округа

Материалы и методы исследования

Учитывая труднодоступность (как в физическом, так и в финансовом плане) большинства территорий арктической зоны, методы ДЗЗ зачастую становятся едва ли не единственным источником информации об их состоянии. Для выделения площади острова, покрытой растительностью, проводилась классификация с обучением (*Supervised Classification*) методом максимального правдоподобия (*Maximum Likelihood Classification*) на основе снимка со спутника Landsat-5 (дата съемки 12.09.2011, время 7:30:21). Выбор эталонов для обучения осуществлялся вручную путем создания ROI (*Region Of Interest*), для идентификации использовались наземные исследования, проводимые коллективом ИЭПС УрО РАН в ходе экспедиционных работ. Облака и их тени, имеющиеся на снимке, выделялись в самостоятельные классы. Всего выделено 4 класса наземных объектов (5 и 6 классы соответствуют облакам и их теням). Классификация осуществлялась в программном продукте ERDAS Imagine. Для исследования изменчивости растительного покрова о. Вайгач использовались два разновременных снимка Landsat-5 (дата съемки 02.08.1988, время 07:18:44) и Landsat-8 (дата съемки 31.07.2013, время 07:43:48). Период съемки выбран не случайно: на конец июля – начало августа в арктических широтах приходится максимум вегетации растительности, что позволяет адекватно оценивать ее состояние. Расчет NDVI производился в программной среде ESRI ArcGIS 10 с использованием NDVI method в Band Arithmetic function (*Image Analysis*). Изменения значений NDVI рассчитывались путем вычитания значений изображения 1988 г. из значений изображений 2013 г. (*Compute Difference Map*).

Результаты исследования и их обсуждение

Характерной чертой растительности о. Вайгач является ее горизонтальная неоднородность. Так, большая северная часть острова относится к подобласти арктических тундр, южная – к северной полосе гипоарктических тундр. Диагностическим признаком арктических тундр и основанием при разделении территории острова на подобласти служит отсутствие в аркти-

ческих тундрах на плакорах группировок с участием гипоарктических кустарников. Видовой состав арктических тундр бедный, очень мало видов цветковых растений. В сложении растительных группировок основную роль играют высокоарктические виды (Александрова, 1983). По данным (Вайгач..., 2011) на острове выражена высотная поясность растительного покрова. До высот 40–60 м выделяется пояс арктических тундр, а выше располагается пояс горных арктических тундр. Горные арктические тундры характерны для гряд и известняковых массивов. В понижениях между грядами формируются мохово-осоковые и осоково-пушицевые болота. На равнинах растительность представлена лишайниково-моховыми и кустарничково-мохово-лишайниковыми тундрами. Растительный покров сомкнутый, в его составе представлены гипоарктические, арктобореальные и бореальные виды растений. На плоских и подтопляемых берегах морских заливов, лайд, формируются луговые сообщества с преобладанием осок, далее располагаются приморские луговины с травянистой растительностью. На каменистых осыпях и в долинах рек развиваются разреженные разнотравные группировки.

По результатам классификации данных ДЗЗ выделены площади острова, занятые растительным покровом (рис. 2).

Процент покрытия территории острова растительностью составляет чуть более 40%. Остальную территорию занимают водные поверхности, каменистые россыпи и скальные выходы, обнажения грунтов (таблица).

Около 3,5% наземной информации скрыто облаками и тенями от них, что соответствует порядка 209 км² на местности. В целом эта цифра незначительна и, учитывая размеры и однообразность ландшафтов острова, ею можно пренебречь.

Соотношение классов объектов по результатам классификации на о. Вайгач

Класс	Характеристика класса	Площадь	
		%	км ²
1	Растительный покров	41,02	1324,47
2	Обнажения грунтов	33,02	1065,56
3	Каменистые россыпи и скальные выходы	16,46	532,50
4	Водные поверхности	3,04	98,20
5	Облака	3,05	98,60
6	Тени от облаков	3,41	110,21
Итого		100	3229,54

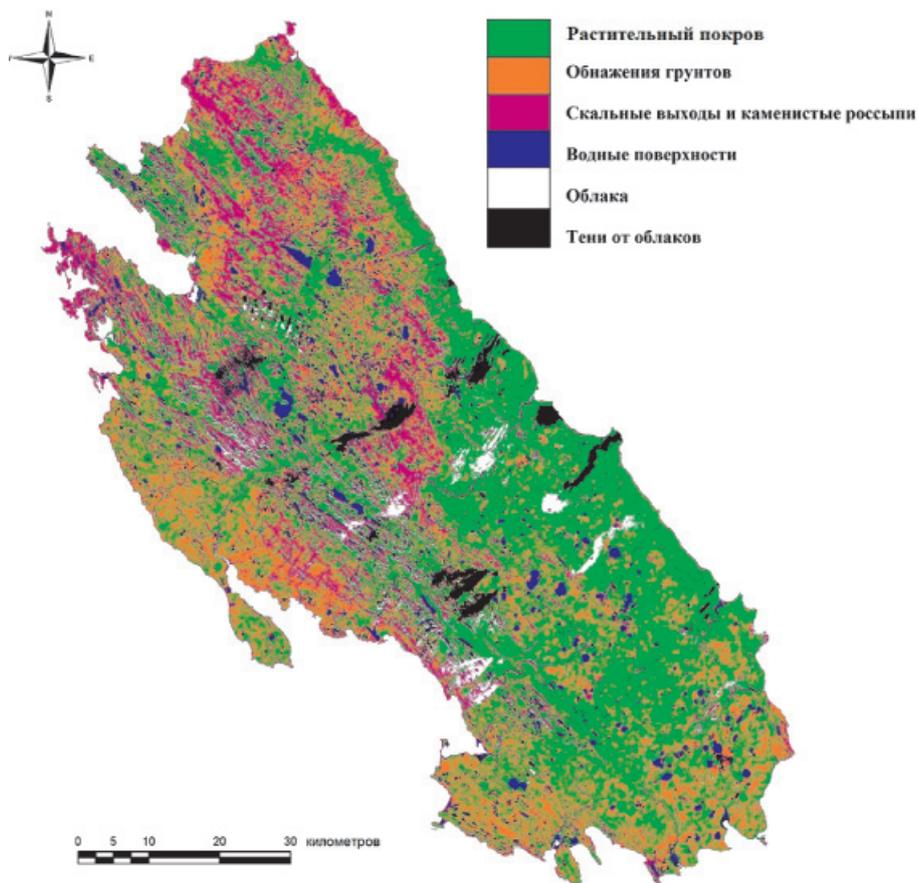


Рис. 2. Классификации с обучением методом максимального правдоподобия для снимка со спутника Landsat-5 на территорию о. Вайгач

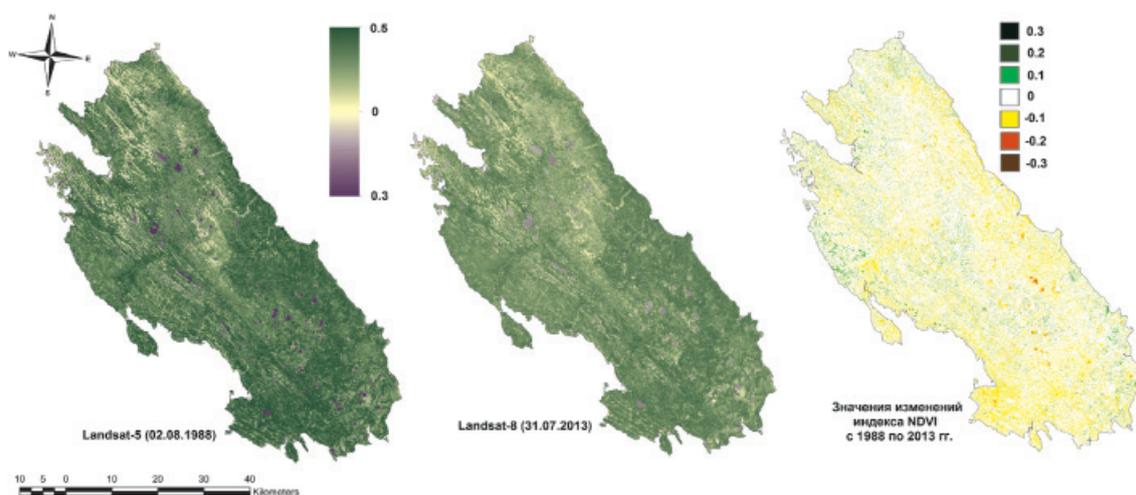


Рис. 3. Картограммы значений индекса NDVI на исходных данных и значений изменения индекса NDVI за 25-летний период

Работы по исследованию динамики растительности о. Вайгач на основе расчета индекса NDVI ранее проводились И.А. Лавриненко. В своей статье (Лавриненко, 2011) автор провел анализ сезонной и межгодовой

динамики растительности юго-западной оконечности острова на основе обработки 28 снимков спутников Landsat 4-7, а также сравнительный анализ показателей NDVI за периоды вегетации (июнь-сентябрь) с 1984

по 2010 гг. Автором выявлены следующие тенденции:

1) произошел сдвиг накопления максимальной продуктивности (максимум вегетации) с июля – начала августа на вторую декаду августа;

2) продолжительность активной вегетации увеличилась примерно на 2 недели;

3) произошло увеличение значений NDVI от 0,3–0,35 до 0,45–0,5, что свидетельствует о возрастании зеленой биомассы на территории исследований за счет увеличения продуктивности трав, кустарничков и кустарников;

4) тенденция нарастания зеленой массы прослеживается во всех типах растительных сообществ.

В данной статье показано, что значения NDVI для острова в целом варьируют в пределах от 0,2 до 0,5, в среднем составляя 0,3–0,35, что соответствует показателям тундровой растительности. При сопоставлении значений NDVI в 1988 г. со значениями 2013 г. можно получить карту значений изменений индекса за 25-летний период (рис. 3).

Выявляются как положительные значения изменений индекса NDVI, так и отрицательные. Визуально можно отметить, что положительные изменения значений NDVI приурочены к центральной части острова, где развит возвышенный рельеф в виде параллельно протянувшихся гряд высотой до 100–150 м. Отрицательные значения изменений индекса характерны в большей степени для побережий и пониженных участков острова.

Выводы

Растительный покров, являясь основным звеном биоценоза, находится в тесной связи с физико-географическими и климатическими условиями и выступает в качестве одного из интегрирующих показателей происходящих экосистемных изменений. Развитие систем спутникового мониторинга фитоценозов расширяет возможности анализа особенностей регионального распределения фитомассы, динамики межгодовых изменений количественных показателей растительного покрова.

На о. Вайгач широко представлены равнинные и горные тундры, приморские, долинные, болотные и водные типы растительности, что связано с разнообразием форм рельефа и ландшафтов.

Значения NDVI для острова варьируют в пределах от 0,2 до 0,5, в среднем составляя 0,3–0,35, что соответствует показателям тундровой растительности. Основной объем фитомассы составляют кустарники

(виды рода *Salix* и *Betula nana*) и злаковые (виды рода *Carex* и др.). В целом за 25-летний период отмечается небольшая тенденция к снижению продуктивности биоценозов (максимальные отрицательные значения изменений индекса NDVI несколько выше положительных), хотя в среднем эта разница не существенна, что свидетельствует о достаточно стабильном состоянии растительного покрова.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФАНО России в рамках проекта № 0410-2014-0024 «Разработка комплексной физико-геоэкологической количественной модели взаимодействия (литосфера, гидросфера, биосфера, атмосфера и, частично, ионосфера) в районах тектонических узлов севера Русской плиты и оценка их влияния на окружающую среду».

Список литературы

1. Александрова В.Д. Растительность полярных пустынь СССР. – Л.: Наука, Ленингр. отд., 1983. – 142 с.
2. Вайгач. Остров арктических богов. 2 том серии «Острова и архипелаги Российской Арктики». Под общей редакцией П.В. Боярского. – М.: Paulsen, 2011. – 576 с.
3. Корейша М.М. Вечная мерзлота острова Вайгач // Journal of Geocryology. – 2000. – Vol. 2. [Электронный ресурс] URL: <http://www.netpilot.ca/geocryology/number2/koreisha2.html> (дата обращения: 24.12.2012).
4. Лавриненко И.А. Динамика растительного покрова острова Вайгач под влиянием климатических изменений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. № 1. – С. 183–189.
5. Лавриненко О.В., Лавриненко И.А. Фитоиндикация изменений климата на северо-востоке европейской части России // География и природные ресурсы. – 2004. – № 2. – С. 54–61.
6. ACIA, Impacts of Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. – Cambridge University Press, 2004. – 1042 p.
7. Could W.A., Mercado-Dias J.A., Zimmerman J.K. Twenty year record of vegetation change from long-term plots in Alaskan tundra // Long Term Ecological Research Network All Scientists Meeting, 14–16 September 2009. – Ester Park. Abstract C11–C0524.
8. Goetz Sc., Bunn A.G., Fiske G.J., Houghton R.A. Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance // PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America). – 2005. – Vol. 102 (38). – P. 13521–13525
9. Jia G.J., Epstein H. Greening of arctic Alaska, 1981–2001 // Geophysical Research Letters. – 2003. – Vol. 30 (20). – P. 3.1–3.3
10. Nghiem S.V., Rigor I.G., Petrovich D.K., Clemente-Coloon P., Weatherly J.W., Neumann G. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice // Geophysical Research Letter. – 2007. – Vol. 34. L19504. – P. 1–6.
11. Sitch S., Smith B., Prentice I.C., et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic vegetation model // Global Change Biology. – 2003. Vol. 9. – P. 161–185.
12. Slayback D.A., Pinzon J.E., Los S.O., Tucker C.J. Northern Hemisphere photosynthetic trends 1982–1899 // Global Change Biology. – 2003. – Vol 9. – P. 1–15.

13. Walker D.A., Bhatt U.S., Epstein H.E., et al. Changing Arctic tundra vegetation biomass and greenness // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2012. – № 93(7). – P. 138–139.

14. White A., Cannell M.G.R., Friend A.D. The high latitude carbon sink: a model analysis // *Global Change Biology*. – 2000. – Vol 6. – P. 227–245.

15. Xu L., Myneni R.B., Chapin III F.S., et al. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // *Nature Climate Change*. – 2013. – Vol 3. – P. 581–586.

References

1. Aleksandrova V.D. *Rastitelnost poljarnyh pustyn SSSR* (The vegetation of the polar deserts of the USSR), Leningrad: Nauka, 1983, 142 p.

2. *Vajgach. Ostrov arkticheskikh bogov* (Vaygach. Island of the Arctic gods), Moscow: Paulsen, 2011, 576 p.

3. Korejska M.M., *Vechnaja merzlota ostrova Vajgach* (Permafrost Vaigach island), *Journal of Geocryology*, 2000, Vol. 2. Available at: <http://www.netpilot.ca/geocryology/number2/koreisha2.html> (accessed: 24.12.2012).

4. Lavrinenko I.A. *Dinamika rastitelnogo pokrova ostrova Vajgach pod vlijaniem klimaticheskikh izmenenij* (Vegetation dynamics Vaigach island under the influence of climate change), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, no. 1, pp. 183–189.

5. Lavrinenko O.V., Lavrinenko I.A., *Fitoindikacija izmenenij klimata na severo-vostoke evropejskoj chasti Rossii* (Phytoindication climate change in the North-East of the European part of Russia), *Geografija i prirodnye resursy*, 2004, no. 2, pp. 54–61.

6. ACIA, *Impacts of Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press, 2004. 1042 p.

7. Could W.A., Mercado-Dias J.A., Zimmerman J.K. Twenty year record of vegetation change from long-term plots in Alaskan tundra // *Long Term Ecological Research Network All Scientists Meeting*, 14-16 September 2009. Ester Park. Abstract C11–C0524

8. Goetz Sc., Bunn A.G., Fiske G.J., Houghton R.A. Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance // *PNAS* (Proceedings of the National Academy of Scienc-

es of the United States of America). 2005. Vol. 102 (38). pp. 13521–13525.

9. Jia G.J., Epstein H. Greening of arctic Alaska, 1981-2001 // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30 (20). pp. 3.1–3.3.

10. Nghiem S.V., Rigor I.G., Petrovich D.K., Clemente-Coloon P., Weatherly J.W., Neumann G. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice // *Geophysical Research Letter*. 2007. Vol. 34. L19504. pp. 1–6.

11. Sitch S., Smith B., Prentice I.C., et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic vegetation model // *Global Change Biology*. 2003. Vol 9. pp. 161–185.

12. Slayback D.A., Pinzon J.E., Los S.O., Tucker C.J. Northern Hemisphere photosynthetic trends 1982–99 // *Global Change Biology*. 2003. Vol 9. pp. 1–15.

13. Walker D.A., Bhatt U.S., Epstein H.E., et al. Changing Arctic tundra vegetation biomass and greenness // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. no. 93(7). pp. 138–139.

14. White A., Cannell M.G.R., Friend A.D. The high latitude carbon sink: a model analysis // *Global Change Biology*. 2000. Vol 6. pp. 227–245.

15. Xu L., Myneni R.B., Chapin III F.S., et al. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // *Nature Climate Change*. 2013. Vol 3. pp. 581–586.

Рецензенты:

Кутинов Ю.Г., д.г.-м.н., академик Европейской академии естественных наук (Германия), директор Центра космического мониторинга Арктики, ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», г. Архангельск;

Беленович Т.Я., д.г.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы, Институт экологических проблем Севера УрО РАН, г. Архангельск.