Исследование трендов NDVI и фенологических параметров растительности мерзлотного региона Сибири по спутниковым наблюдениям

Е.В. Варламова, В.С. Соловьев

*Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН
г. Якутск, 677980, Россия
E-mail: varlamova1@ikfia.sbras.ru*

По данным радиометра AVHRR/NOAA (1982–2014 гг.) проведены исследования пространственно-временных изменений вегетационного индекса NDVI и фенологических характеристик растительности мерзлотного региона Сибири (на примере Якутии). Построены карты трендов NDVI, среднегодовой температуры воздуха и атмосферных осадков. Также построены карты корреляций NDVI с метеорологическими параметрами. Для исследования были выбраны два участка с тундровой растительностью на севере Якутии и один – в центральной части Якутии, покрытый хвойными листопадными лесами. Участки характеризуются однородным типом растительности, низменным рельефом и схожими (в пределах одной природной зоны) климатическими параметрами. По методике, основанной на условии устойчивого перехода температуры воздуха через +5 °С, рассчитаны начало, окончание и продолжительность сезона вегетации на выбранных участках. Показано, что на протяжении последних трех десятилетий на территории Восточной Сибири наблюдается положительный тренд NDVI, исключение составляют небольшие локальные участки. На исследуемой территории наблюдается положительная связь NDVI с температурой воздуха, связь NDVI с осадками не обнаружена. За рассматриваемый период отмечается рост продолжительности сезона вегетации на всех участках. Рост продолжительности вегетационного сезона в хвойных лесах в основном обусловлен более ранним началом и в меньшей степени поздним окончанием сезона, тогда как для тундровой растительности – как ранним началом, так и поздним окончанием сезона вегетации. Сделан вывод, что температура воздуха является более важным по сравнению с осадками фактором, существенно влияющим на динамику растительности мерзлотного региона Сибири.

Ключевые слова: NDVI, фенологические параметры, вегетационный сезон, мерзлотный регион, Восточная Сибирь, AVHRR

*Одобрена к печати: 29.03.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-206-214*

Введение

За последние десятилетия температура воздуха в российской Арктике выросла примерно вдвое больше, чем в среднем по всей Земле, а моделирование будущих климатических трендов показывает, что самые большие изменения также затронут этот регион (IPCC..., 2013). Вследствие потепления климата площадь морского льда в Арктике за период 1979–2015 гг. сократилась почти в два раза (IPCC..., 2013). В результате произошло значительное увеличение свободного водного пространства Северного ледовитого океана и, как следствие, возросла интенсивность эксплуатации Северного морского пути. Появились перспективы более широкого освоения ресурсов Арктики и развития добывающей промышленности, что, безусловно, приведет к повышению рисков чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера. Вследствие сурового климата Арктики и низкого реабилитационного потенциала северных экосистем ЧС могут вызвать катастрофические последствия для северной природы. Поэтому актуальность всестороннего мониторинга изменений природной среды Арктики и прилегающих северных территорий крайне высока.

Растительный покров является одним из компонентов природной экосистемы, наиболее чувствительный к процессам глобального потепления и отражающий изменения в экологической обстановке окружающей среды (Seddon et al., 2016; Bachelet et al., 2001;

Pudas et al., 2008; Варламова, Соловьев, 2012a, 2012b; Varlamova, Solovyev, 2015, 2016). В настоящее время изучению состояния растительного покрова посвящен ряд исследований, показывающих, что вследствие потепления климата наблюдаются тенденции роста вегетационного индекса NDVI и изменения сроков фенологических событий (Myneni et al., 1997; Tucker et al., 2001; Delbart et al., 2008; Eastman et al., 2013; Zhao et al., 2015). Однако в этих работах подход к изучению изменений состояния растительности имеет глобальный характер, не учитывающий специфику климатических характеристик, ландшафта, типов растительности и др. регионального масштаба.

Целью работы является исследование трендов индекса вегетации NDVI и фенологических характеристик растительности мерзлотного региона Сибири (на примере Якутии) по данным многолетних спутниковых наблюдений (1982–2014 гг.).

Данные и методика

Длинные ряды данных ДЗЗ позволяют исследовать тенденции изменений параметров подстилающей поверхности за большой временной период. Для оценки состояния растительности использован вегетационный индекс NDVI, имеющий наиболее широкий динамический диапазон и лучшую чувствительность к изменениям в растительном покрове (Rouse et al., 1973).

В работе использованы данные многоканального радиометра AVHRR/NOAA (1982–2014 гг.) проекта GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies), представляющие собой архив 15-дневных значений NDVI (Tucker et al., 1994). Также привлекались данные AVHRR/NOAA, полученные на станции приема ИКФИА СО РАН (г. Якутск) в 1998–2014 гг. Значения температуры приземного слоя воздуха и атмосферных осадков взяты из среднемесячного набора данных CRU TS v.3.23 (Jones, Harris, 2014). Среднесуточная приземная температура воздуха рассчитывалась по 4-часовым данным реанализа ERA-Interim (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>).

Выделение участков с однородным типом растительности и соответствующие векторные маски исследуемых участков создавались на основе цифровой карты наземных экосистем Северной Евразии (Bartalev et al., 2003).

На территории Якутии (Восточная Сибирь) были выбраны три исследуемых участка (*рис. 1а*), характеризующихся однородным типом растительности, низменным рельефом и близкими (в пределах одной природной зоны) климатическими параметрами. Из них два участка (№ 1, 2) расположены в зоне тундры, где преобладает кустарниковая и травянистая растительность, и один участок (№ 3) находится в центральной Якутии, где основной тип растительности представлен лиственничными лесами, относящимися к хвойному листопадному типу деревьев.

Существуют различные подходы в определении фенологических дат вегетационного сезона – начала SOS (Start Of growing Season), окончания EOS (End Of growing Season)

и продолжительности LOS (Length Of growing Season). Обзоры методик расчета фенологических сроков можно найти в статьях (Медведева и др., 2008; Миклашевич, Барталев, 2016; Ge et al., 2016 и др). В данной работе использована рекомендованная для растительности средних и высоких широт методика определения фенологических дат начала и окончания вегетационного сезона по условию устойчивого перехода температуры воздуха через $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно весной и осенью (Науменко, 1982; Jones, Briffa, 1995; Carter, 1998; Frich et al., 2002; Степанова, 2009). Таким образом, для исследуемых участков были рассчитаны и построены ежегодные (с 1982 по 2014 год) карты фенологических параметров тундровой растительности и хвойных листопадных лесов.

Результаты и обсуждения

Территория Якутии находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Климат региона – резко-континентальный с характерным коротким жарким летом, продолжительной холодной зимой и быстротечным межсезоньем. Температурный перепад между экстремальными значениями в зимний и летний периоды может превышать $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Среднегодовые атмосферные осадки составляют $\sim 150\text{--}250$ мм, что соответствует показателям зоны полупустынь.

На основе 15-дневных значений NDVI (проект GIMMS), усредненных с мая по сентябрь, была построена карта тренда NDVI растительного покрова Восточной Сибири за период 1982–2014 гг., представленная на *рис. 1б*. Цветовой кодировкой (см. легенду карты) с шагом 5% в диапазоне -15% – $+15\%$ маркированы области с различными значениями прироста NDVI. Как следует из *рис. 1б*, зоны с наибольшими значениями ($\sim 10\text{--}15\%$) роста NDVI располагаются севернее Приленского плато (выше 60-й параллели). Небольшие участки с отрицательным ($\sim -5\%$ – -15%) приростом NDVI наблюдаются к северо-западу в районе Хантайского и Виллюйского водохранилищ. Тем не менее в целом на территории Восточной Сибири преобладает тенденция роста NDVI. Средний показатель роста NDVI растительного покрова на территории, представленной на *рис. 1б*, составил $\sim 3\%$.

Отметим, что за рассматриваемый период (1982–2014 гг.) также наблюдается рост среднегодовых температур приземного слоя воздуха (*рис. 2а*). Цветовой кодировкой показаны тренды температуры воздуха в диапазоне $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Как следует из *рис. 2а*, наиболее значительный рост температуры воздуха ($\sim 2\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдается севернее 60-й параллели, южнее которой и западней 130 меридиана прирост температуры заметно меньше и составляет $\sim 0,5\text{--}1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также наблюдаются участки с околонулевыми и небольшими значениями отрицательного тренда. На *рис. 2б* показана карта тренда суммы годовых атмосферных осадков, на которой присутствуют участки как с положительными, так и с отрицательными значениями. В целом на большей части территории наблюдается рост годовых осадков.

Рис. 1. а) расположение и векторные маски исследуемых участков, обозначенных номерами 1, 2, 3; б) карта значений трендов NDVI (май–сентябрь 1982–2014 гг.)

Рис. 2. Карты трендов за 1982–2014 гг.: а) среднегодовых температур приземного слоя воздуха; б) суммы атмосферных осадков

Для анализа связи NDVI с температурой воздуха и атмосферными осадками были рассчитаны соответствующие коэффициенты корреляции, карты распределения которых представлены на рис. 3а, б. Значения коэффициентов корреляции отображены в соответствии с цветовой кодировкой, представленной на рис. 3. Как следует из рис. 3а, на исследуемой территории доминируют положительные значения корреляции NDVI с температурой воздуха, при этом средний показатель коэффициента корреляции составил $\sim 0,4$. Наиболее высокие показатели корреляции ($\sim 0,7$ – $0,8$) наблюдаются севернее Приленского плато – там же, где наблюдаются наибольшие тренды NDVI. Можно отметить, что на участках, где корреляция отсутствует, чаще наблюдаются отрицательные тренды NDVI (рис. 1б). Связь NDVI с осадками выглядит иначе (рис. 3б) – на всей территории наблюдается неоднородное распределение незначительного по величине коэффициента корреляции ($\sim -0,3$ – $+0,3$), что можно интерпретировать как отсутствие значимой связи роста NDVI с атмосферными осадками.

Рис. 3. Карты распределения коэффициентов корреляций (за период май–сентябрь 1982–2014 гг.): а) NDVI и температуры приземного слоя воздуха; б) NDVI и суммы атмосферных осадков

По данным среднесуточных температур воздуха были определены фенологические параметры (SOS, EOS, LOS) растительности трех исследуемых участков и построены графики годовых вариаций (1982–2014 гг.), представленные на рис. 4а, б, с. По горизонтальной оси отложены годы, по вертикальной – значения SOS (рис. 4а), EOS (рис. 4б) и LOS (рис. 4с). Сплошными линиями показаны вариации фенологических параметров растительности участка 1, штриховыми линиями – участка 2 и штрихпунктирными линиями – участка 3.

Рис. 4. Вариации фенологических параметров SOS (а), EOS (б) и LOS (с) за период 1982–2014 гг. для участков 1, 2 и 3

Графики имеют изменчивый характер, но в целом наблюдаются выраженные тренды отрицательного и положительного знаков. Из *рис. 4а* видно, что SOS для всех участков имеет тенденцию к снижению, что говорит о более раннем начале сезона вегетации. Напротив, EOS (*рис. 4б*) имеет положительный тренд, что означает более позднее завершение сезона вегетации. Таким образом, на всех участках наблюдается увеличение длительности (LOS) сезона вегетации (*рис. 4с*). На северных участках значения фенологических параметров заметно отличаются от аналогичных на центральном участке, что объясняется отличиями климатических зон и типов растительности.

В *табл. 1* представлен рост линейных трендов SOS, EOS и LOS, а также среднегодовой температуры воздуха и суммы атмосферных осадков для исследуемых участков. Как следует из таблицы, на участках 1 и 2 тренд LOS составляет соответственно 28 и 25 дней, что заметно больше (в 2-2,5 раза), чем на участке 3, где тренд LOS равен 11 дням. Увеличение LOS на участках 1 и 2 обусловлено в равной степени более ранним началом на 15 и 12 дней соответственно и более поздним окончанием сезона вегетации на 13 дней. На участке 3 увеличение LOS происходит за счет более раннего начала SOS – тренд SOS больше, чем тренд EOS в ~ 10 раз.

Таблица 1. Рост трендов фенологических и метеорологических параметров за период 1982–2014 гг. для исследуемых участков

№	Параметры (ед. изм.)	1 участок	2 участок	3 участок
1	SOS (дни)	-15	-12	-10
2	EOS (дни)	13	13	1
3	LOS (дни)	28	25	11
4	Среднегодовая температура (°C)	2,8	2,8	1,2
5	Сумма осадков (мм)	22	17	66

Отметим, что за рассматриваемый период рост среднегодовой температуры воздуха на северных участках 1, 2 составил 2,8 °C, что заметно выше (также как и LOS участков 1, 2) по сравнению с участком 3, где температурный рост составил 1,2 °C. Тренд суммы атмосферных осадков в целом незначителен. Следовательно, можно сделать вывод, что температура воздуха является доминирующим фактором в росте NDVI растительного покрова Восточной Сибири, тогда как роль атмосферных осадков незначительна.

Выводы

Карта распределения тренда NDVI растительности мерзлотного региона Сибири (Восточной Сибири) за 1982–2014 гг. неоднородна – присутствует заметная градиация положительных и отрицательных значений. Однако в целом преобладает положительная динамика, и средний рост тренда NDVI составил ~3%. Наиболее высокий прирост (10–15%)

NDVI наблюдается на севере Якутии. На всей исследуемой территории в основном наблюдается положительная корреляция температуры воздуха с индексом вегетации. Наиболее высокие показатели коэффициента корреляции ($\sim 0,7-0,8$) также наблюдаются на севере Якутии. Корреляция NDVI с атмосферными осадками незначительна.

В течение последних трех десятилетий отмечается увеличение продолжительности вегетационного сезона растительности исследуемых участков. Наиболее существенное увеличение тренда продолжительности сезона вегетации наблюдается в тундровой зоне (28 и 25 дней соответственно для участков 1, 2) и обусловлено более ранним началом и более поздним окончанием сезона вегетации. В центральной Якутии наблюдается аналогичная динамика, но тенденция роста продолжительности вегетационного сезона (11 дней) меньше и обусловлена в большей степени более ранним началом сезона вегетации (на 10 дней).

Таким образом, можно сделать вывод, что доминирующее влияние на положительную динамику растительности мерзлотного региона Сибири (Восточная Сибирь) оказывает температура воздуха, тогда как влияние атмосферных осадков незначительно.

Литература

1. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование динамики индекса растительности арктической зоны Восточной Сибири по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012а. Т. 9. № 1. С. 65–70.
2. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Мониторинг растительного покрова арктической зоны Восточной Сибири по спутниковым данным // Наука и образование. 2012б. № 2 (66). С. 58–62.
3. Медведева М.А., Барталев С.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М., Толпин В.А., Пойда А.А. Возможности оценки момента наступления вегетационного сезона на основе спутниковых и метеорологических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. № 5. С. 313–321.
4. Миклашевич Т.С., Барталев С.А. Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 9–24.
5. Науменко А.Т. Сезонная жизнь природы горновулканической территории восточной Камчатки // Сезонная ритмика природы горных областей. Ленинград: Сев.-Зап. книж. изд., 1982. С. 13–15.
6. Степанова Т.А. Метеорологическое обеспечение агронома. Методические указания. Вологда-Молочное, 2009. 16 С.
7. Bachelet D., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J. Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States // *Ecosystems*. 2001. Vol. 4. No. 3. P. 164–185.
8. Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S. A new Spot4-vegetation derived land cover map of northern Eurasia // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24. No. 9. P. 1977–1982.
9. Carter T.R. Changes in the thermal growing season in Nordic countries during the past century and prospects for the future // *Agricultural and Food Science in Finland*. 1998. Vol. 7. P. 161–179.
10. Delbart N., Picard G., Toans Le T., Kergoat L., Quegan S., Woodward I., Dye D., Fedotova V. Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale // *Global Change Biol*. 2008. No. 14. P. 603–614.
11. Eastman J.R., Sangermano F., Machado E.A., Rogan J., Anyamba A. Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011 // *Remote Sensing*. 2013. No. 5. P. 4799–4818.
12. Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M.G., Peterson T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century // *Climate Research*. 2002. Vol. 19. P. 193–212.
13. Ge Q., Dai J., Cui H., Wang H. Spatiotemporal Variability in Start and End of Growing Season in China Related to Climate Variability // *Remote Sensing*. 2016. No. 8. P. 433–449.
14. Jones P.D., Briffa K.R. Growing season temperatures over the former Soviet Union // *International Journal of Climatology*. 1995. Vol. 15. P. 943–959.
15. Jones P.D., Harris I. CRU TS3.22: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.22 of High Resolution Gridded Data of Month-by-Month Variation in Climate (Jan. 1901–Dec. 2013). University of East Anglia Climatic Research Unit, NCAS British Atmospheric Data Centre: Didcot. UK. 2014. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/data> (accessed on 11.01.2014).
16. Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G., Nemani R.R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 // *Nature*. 1997. No. 386. P. 698–702.

17. Pudas E., Leppala M., Tolvanen A., Poikolainen J., Venalainen A., Kubin E. Trends in phenology of *Betula pubescens* across the boreal zone in Finland // *Int. J. Biometeor.* 2008. No. 52. P. 251–259.
18. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // 3rd ERTS Symposium. 1973. NASA SP-351. Vol. 1. P. 309–317.
19. Seddon A.W.R., Macias-Fauria M., Long P.R., Benz D., Willis K.J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability // *Nature*. 2016. No. 531. P. 229–232.
20. IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. NY. USA. 2013. 1535 p.
21. Tucker C.J., Slayback D.A., Pinzon J.E., Los S.O., Myneni R.B., Taylor M.G. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999 // *Int. J. Biometeorol.* 2001. Vol. 45. No. 4. P. 184–190.
22. Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E. Global Inventory Modeling and Mapping Studies. NA94apr15b.n11-VIg, 2.0, 04/15/1994. Global Land Cover Facility. University of Maryland. College Park. Maryland. 2004. <http://staff.glc.f.umd.edu/sns/branch/htdocs.sns/data/gimms/>.
23. Varlamova E.V., Solovyev V.S. Study of NDVI Variations in Tundra and Taiga Areas of Eastern Siberia (Yakutia) // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015. Vol. 28. No. 1. P. 64–67.
24. Varlamova E.V., Solovyev V.S. Research of spatio-temporal variations of vegetation phenological parameters in East Siberia. Climate and permafrost ecosystems: “C/H₂O/energy balance and climate over the boreal and Arctic regions with special emphasis on Eastern Eurasia” // *Proceedings of IXth International Symposium*. Yakutsk. 1–4 November. 2016. Nagoya: Nagoya University Publishing House, 2016. P. 106.
25. Zhao J., Zhang H., Zhang Z., Guo X., Li X., Chen C. Spatial and Temporal Changes in Vegetation Phenology at Middle and High Latitudes of the Northern Hemisphere over the Past Three Decades // *Remote Sensing*. 2015. No. 7. P. 10973–10995.

Study of NDVI trends and vegetation phenological parameters in permafrost region of Siberia by satellite observations

E.V. Varlamova, V.S. Solovyev

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk 677980, Russia
E-mail: varlamova1@ikfia.sbras.ru

A study of NDVI spatio-temporal changes and vegetation phenological parameters in permafrost region of Siberia (on example of Yakutia) was carried out using AVHRR/NOAA data (1982–2014). The maps of the NDVI trends and meteorological parameters (annual air temperature, precipitation) were created. Maps of NDVI correlation with air temperature and precipitation were also compiled. To study phenological parameters, two sites with tundra vegetation in northern Yakutia and one site with deciduous needleleaf forests in central part of Yakutia were selected. The sites are characterized by homogeneous type of vegetation, lowland and similar (within one natural area) climatic parameters. A method based on stable transition of air temperature through +5 °C was used to estimate the beginning, the end and the length of the growing season for selected sites. Over the past three decades, a positive NDVI trend is observed in the whole of Eastern Siberia, except for some small areas. Positive relations between the NDVI and air temperature in study areas are observed. The correlation of NDVI and precipitation was not established. During the study period, the length of the growing season (LOS) increased in all sites. The LOS of deciduous needleleaf forests increases mainly due to earlier start of the growing season. The LOS of tundra vegetation increases due to earlier start and later end of the growing season as well. Air temperature is more important than precipitation among the factors significantly influencing vegetation variations in the permafrost region of Siberia.

Keywords: NDVI, phenological parameters, growing season, permafrost region, Eastern Siberia, AVHRR

Accepted: 29.03.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-206-214

References

1. Varlamova E.V., Solov'ev V.S., Issledovanie dinamiki indeksa rastitel'nosti arkticheskoi zony Vostochnoi Sibiri po sputnikovym dannym (Study of vegetation index variation in Arctic zone of Eastern Siberia on satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 65–70.
2. Varlamova E.V., Solov'ev V.S., Monitoring rastitel'nogo pokrova arkticheskoi zony Vostochnoi Sibiri po sputnikovym dannym (Monitoring of vegetation cover in Arctic zone of Eastern Siberia on satellite data), *Nauka i obrazovanie*, 2012, No. 2 (66), pp. 58–62.
3. Medvedeva M.A., Bartalev S.A., Loupian E.A., Matveev A.M., Tolpin V.A., Poida A.A., Vozmozhnosti otsenki momenta nastupleniya vegetatsionnogo sezona na osnove sputnikovyykh i meteorologicheskikh dannykh (The possibility of estimating the onset of the growing season based on satellite and meteorological data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 313–321.
4. Miklashevich T.S., Bartalev S.A., Metod opredeleniya fenologicheskikh kharakteristik rastitel'nogo pokrova na osnove vremennykh ryadov sputnikovyykh dannykh (Method for estimating vegetation cover phenological characteristics from satellite data time series), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 9–24.
5. Naumenko A.T., Sezonnaya zhizn' prirody gornovulkanicheskoi territorii vostochnoi Kamchatki (Seasonal nature of volcanic mountain area in Eastern Kamchatka), *Sezonnaya ritmika prirody gornyykh oblastei*, Leningrad: Sev.-Zap. knizh. izd., 1982, pp. 13–15.
6. Stepanova T.A., *Meteorologicheskoe obespechenie agronoma, Metodicheskie ukazaniya*, Vologda-Molochnoe, 2009, 16 p.
7. Bachelet D., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J., Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States, *Ecosystems*, 2001, Vol. 4, No. 3, pp. 164–185.
8. Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S., A new Spot4-vegetation derived land cover map of northern Eurasia, *International Journal of Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, No. 9, pp. 1977–1982.
9. Carter T.R., Changes in the thermal growing season in Nordic countries during the past century and prospects for the future, *Agricultural and Food Science in Finland*, 1998, Vol. 7, pp. 161–179.
10. Delbart N., Picard G., Toans Le T., Kergoat L., Quegan S., Woodward I., Dye D., Fedotova V., Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale, *Global Change Biol.*, 2008, No. 14, pp. 603–614.
11. Eastman J.R., Sangermano F., Machado E.A., Rogan J., Anyamba A., Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011, *Remote Sensing*, 2013, No. 5, pp. 4799–4818.
12. Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M.G., Peterson T., Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century, *Climate Research*, 2002, Vol. 19, pp. 193–212.
13. Ge Q., Dai J., Cui H., Wang H., Spatiotemporal Variability in Start and End of Growing Season in China Related to Climate Variability, *Remote Sensing*, 2016, No. 8, pp. 433–449.
14. Jones P.D., Briffa K.R., Growing season temperatures over the former Soviet Union, *International Journal of Climatology*, 1995, Vol. 15, pp. 943–959.
15. Jones P.D., Harris I., CRU TS3.22: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.22 of High Resolution Gridded Data of Month-by-Month Variation in Climate (Jan. 1901–Dec. 2013), University of East Anglia Climatic Research Unit, NCAS British Atmospheric Data Centre: Didcot, UK, 2014, available at: <http://www.cru.uea.ac.uk/data> (accessed on 11.01.2014).
16. Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G., Nemani R.R., Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991, *Nature*, 1997, No. 386, pp. 698–702.
17. Pudas E., Leppala M., Tolvanen A., Poikolainen J., Venalainen A., Kubin E., Trends in phenology of *Betula pubescens* across the boreal zone in Finland, *Int. J. Biometeor.*, 2008, No. 52, pp. 251–259.
18. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *3rd ERTS Symposium*, 1973, NASA SP-351, Vol. 1, pp. 309–317.
19. Seddon A.W.R., Macias-Fauria M., Long P.R., Benz D., Willis K.J., Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability, *Nature*, 2016, No. 531, pp. 229–232.
20. IPCC: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press., Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, 1535 p.
21. Tucker C.J., Slayback D.A., Pinzon J.E., Los S.O., Myneni R.B., Taylor M.G., Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999, *Int. J. Biometeorol.*, 2001, Vol. 45, No. 4, pp. 184–190.
22. Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., *Global Inventory Modeling and Mapping Studies, NA94apr15b.n11-V1g, 2.0*, 04/15/1994, Global Land Cover Facility. University of Maryland, College Park, Maryland, 2004, available at: <http://staff.glcf.umd.edu/sns/branch/htdocs.sns/data/gimms/>.
23. Varlamova E.V., Solovyev V.S., Study of NDVI Variations in Tundra and Taiga Areas of Eastern Siberia (Yakutia), *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, Vol. 28, No. 1, pp. 64–67.
24. Varlamova E.V., Solovyev V.S., Research of spatio-temporal variations of vegetation phenological parameters in East Siberia. Climate and permafrost ecosystems: “C/H₂O/energy balance and climate over the boreal and Arctic regions with special emphasis on Eastern Eurasia”, *Proceedings of IXth International Symposium*, Yakutsk, 1–4 November, 2016, Nagoya: Nagoya University Publishing House, 2016, p. 106.
25. Zhao J., Zhang H., Zhang Z., Guo X., Li X., Chen C., Spatial and Temporal Changes in Vegetation Phenology at Middle and High Latitudes of the Northern Hemisphere over the Past Three Decades, *Remote Sensing*, 2015, No. 7, pp. 10973–10995.