Динамика индекса NDVI для разных классов территориальных единиц растительности типичных тундр

К. В. Иванова

*Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН
Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: ivanova.xenia@ya.ru*

Растительный покров тундровой зоны отчётливо реагирует на колебания климатических условий. В данной работе с использованием спутниковых снимков (Sentinel-2A) была изучена сезонная динамика вегетационного индекса в течение 2017–2018 гг. и межгодовая (Landsat-5, -8) динамика NDVI в начальный период вегетации на территории возвышенности Вангуреймусюр (Большеземельская тундра, Ненецкий АО), которая относится к подзоне типичных тундр. Наибольшие различия между показателями индекса для разных классов территориальных единиц растительности (ТЕР) прослеживаются в период с середины июня до середины июля. В конце июля – начале августа при достижении максимальных значений индекса наблюдается сближение этих показателей, и пик вегетации для всех классов приходится на конец июля – начало августа. Максимальные значения NDVI отмечены для классов ТЕР плоских слабоденированных террас и проточных понижений водоразделов; минимальные — для отдела речных долин, а в отделе водоразделов — для класса приозёрных понижений. Сравнительный анализ межгодовых показателей NDVI за начальный период вегетации показал общую тенденцию снижения значений индекса за последние два десятилетия, т.е. уменьшение накопления надземной зелёной фитомассы. При этом различия между классами ТЕР сохраняются. Полученные результаты свидетельствуют о сдвиге сроков начала вегетации, что подтверждается работами ряда отечественных и зарубежных исследователей.

Ключевые слова: растительность, территориальные единицы растительности, динамика NDVI, восточноевропейские тундры, Арктика

Одобрена к печати: 04.09.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-194-202

Введение

Изучение динамики состава и структуры растительного покрова Арктики под влиянием флуктуаций климата становится всё более актуальным, поскольку, с одной стороны, растительные сообщества этого региона отчётливо реагируют на климатические изменения, а с другой — именно растительность представляет собой наиболее чувствительный индикатор процессов, происходящих в природных экосистемах (Bhatt et al., 2017; Bratsch et al., 2016; Fraser et al., 2014; Kennedy, 2012; Laidler et al., 2008; May et al., 2017; Pouliot et al., 2009; Reynolds, Walker, 2016 и мн. др.).

При изучении динамики нормализованного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (на основе анализа спутниковых снимков AVHRR), непосредственно связанного с показателями надземной зелёной фитомассы, для циркумполярных областей за период с 1982 г. на модельных площадках было выявлено увеличение значения этого показателя на 93 % площади всей территории (Epstein et al., 2012). Основной причиной, которая привела к таким изменениям, является возрастание проективного покрытия и доли участия трав и кустарников в составе растительных сообществ тундровых экосистем и, соответственно, увеличение надземной зелёной фитомассы. Это основной процесс, который определяет так называемое позеленение Арктики (Blok et al., 2011; Epstein et al., 2013; Myers-Smith et al., 2015). Наряду с этим возрастание значений вегетационного индекса косвенно обусловлено влиянием на растительность ряда абиотических факторов, в том числе почвенного увлажнения (Leibman et al., 2011). Так, с одной стороны, возрастание числа осадков на территории приводит к более активному росту трав и кустарников, следовательно, к увеличению

значений NDVI (спутниковые снимки AVHRR). С другой стороны, более сухие местообитания отличаются и большей амплитудой колебаний этого индекса (Raynolds et al., 2013).

Установлена достоверная связь между положением сообществ в ландшафте и особенностями динамики вегетационного индекса (Leibman et al., 2011). Некоторое уменьшение максимальных значений NDVI наиболее заметно в долинах рек, ручьёв и вдоль озёр, где активны процессы эрозии береговой линии, приводящие к разрушению существующих сообществ, причём, чем больше крутизна склона, на котором расположена изучаемая площадка, тем менее отчётливо проявляются изменения NDVI (Raynolds, Walker, 2016; Raynolds et al., 2013).

Для разных типов растительных сообществ Аляски установлены особенности динамики индекса: кустарничково-осоково-моховые фитоценозы имеют достоверный положительный тренд (в среднем за десятилетие значение индекса увеличилось примерно на 0,03), тогда как увлажнённые отравяненные тундры, включающие окраины озёр и обводнённые сообщества со стоячей водой, показали обратную тенденцию (в среднем за 10 лет произошло уменьшение значения NDVI на 0,065 единиц) (Raynolds et al., 2013).

Как было отмечено, нет единого тренда изменения NDVI, общего для всех арктических территорий. Так, рядом исследователей (Epstein et al., 2012; Park et al., 2016) была изучена динамика надземной фитомассы всех тундровых сообществ в период с 1982 по 2010 г. на основе снимков MODIS. В среднем показатель увеличился за изучаемый период на 19,8 %, в более южных участках прирост составил 20–26 %, в наиболее северных — 2,1 %. Кроме широтных были установлены и региональные особенности динамики показателя NDVI. Например, в пределах Канино-Печорской флористической подпровинции (район исследований) за период 1982–2010 гг. в среднем зарегистрировано снижение значения индекса на 2,7 %.

По мнению некоторых исследователей (Walker et al., 2009), отсутствие существенных различий вегетационного индекса в пределах отдельных регионов может быть обусловлено низким разрешением снимков, используемых для расчёта. Мелкоконтурность тундровых сообществ приводит к тому, что в один пиксел часто попадают сообщества разных классов растительности, такие как луговые и кустарниковые фитоценозы речных долин, увлажнённых понижений на водоразделах и ложбин стока, которые отличаются большей фитомассой, чем территориально смежные с ними фитоценозы кустарничковых и лишайниковых тундр, песчаных и галечниковых обнажений, нивальных местообитаний, обводнённых топей бугристых болот. При использовании таких снимков зачастую не учитываются и водные объекты, которые преимущественно отличаются очень низкими показателями NDVI. В результате значения показателя вегетационного индекса усредняются и весьма поверхностно отражают реальную картину его многолетней динамики.

В связи с этим основной целью настоящей работы стало изучение и анализ сезонной и межгодовой динамики индекса NDVI для разных классов растительности в пределах ключевого участка конкретного геоботанического района за период с 2000 по 2018 г.

Объекты и методы

Полевые работы (июль 2017 г.) были проведены в пределах ключевого участка (16,5 км²) на территории возвышенности Вангуреймусюр (Ненецкий АО, Большеземельская тундра, Вангурейский геоботанический район) (Лавриненко, 2013). В результате полевых работ выполнено 33 полных и 50 маркерных геоботанических описаний (рис. 1, см. с. 196).

В полевых условиях выделяли и описывали территориальные единицы растительности (ТЕР), отчётливо различимые на местности и на материалах спутниковых снимков Landsat-5, -8 и Sentinel-2A, что соответствует их размерам в поперечнике не менее 50–70 м. Учитывая мелкоконтурность и мозаичность растительного покрова, ТЕР были представлены преимущественно комбинациями сообществ разных классификационных единиц. Так, если гомогенные ТЕР представлены фитоценозом одной ассоциации (фитоценомером), то в пределах гетерогенных единиц в отечественной литературе различают три основных типа, различающихся по структуре: комплексы, экологические и серийные ряды (Грибова, Исаченко, 1972), которые представлены комбинациями фитоценомеров.

Рис. 1. Ключевой участок возвышенности Вангурей (а), точки геоботанических описаний (б) и крупномасштабная карта классов территориальных единиц растительности (здесь и далее расшифровка легенды представлена в тексте) (в)

Для выделения, классификации и картографирования подобных комбинаций И.А. Лавриненко предложил типологическую схему (Лавриненко, 2015, 2019), основанную как на отечественных подходах, так и на новейших работах западноевропейских геоботаников и картографов (Delbosc et al., 2015–2017; Savio et al., 2015 и др.). В соответствии с предложенной типологией на геоботанической карте было выделено 14 различных типов ТЕР, которые относятся к двум отделам: водораздельных местообитаний (*Divortium horiophyta*) и речных долин (*Vallis horiophyta*).

В отделе ТЕР водоразделов нами было выделено 7 классов: 1 — псаммофитные местообитания; 2 — плакорные местообитания; 3 — крутые (более 15°) склоны водораздельных

холмов; 4 — плоские слабодренированные террасы; 5 — бугристые торфяники; 6 — приозёрные понижения; 7 — проточные понижения водоразделов. Отдел ТЕР речных долин (8) более подробно не рассматривается.

При анализе растительности на мультиспектральных снимках был использован нормализованный вегетационный индекс NDVI, отражающий продуктивность наземной зелёной фитомассы. Для общей оценки сезонной динамики вегетационного индекса был проведён анализ серии доступных спутниковых снимков Sentinel-2 за 2017 и 2018 гг., которые в целом дают представление о нарастании наземной зелёной фитомассы в пределах разных классов ТЕР в течение вегетационного периода.

При изучении межгодовой динамики растительного покрова были использованы снимки Landsat-5, -8 за временной диапазон с 4 по 18 июля, который характеризует начало периода вегетации в этом районе, за последние 18 лет (2000, 2007, 2010, 2014, 2016–2018). Рассчитывались усреднённые значения индекса NDVI за каждый год, которые в дальнейшем использовались для сравнительного анализа.

Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI

С начала июня по вторую декаду июля в результате неравномерного стаивания снега различия между значениями NDVI для разных классов территориальных единиц растительности становятся наиболее заметными (рис. 2). В конце июля — начале августа при достижении максимальных значений индекса (пик вегетации) наблюдается сближение этих показателей.

Рис. 2. Показатели NDVI для разных классов ТЕР: а — 2017 г.; б — 2018 г.

В течение всего вегетационного периода наименьшие значения индекса были отмечены для отдела фитоценозов речных долин (8), что вызвано их глубоким врезом в рельеф, вследствие чего снег долгое время не сходит со склонов и нивальных ниш. Это вызывает задержку начала вегетации растительности данных местообитаний и в целом значительно занижает

показатели NDVI в пределах речных долин. В отделе водораздельных террас более низкие показатели NDVI были присущи классу приозёрных понижений (6). Это можно объяснить структурой данного типа ТЕР: в непосредственной близости от водоёма преимущественно встречаются лишь отдельные экземпляры растений (в основном *Carex aquatilis* subsp. *stans*), растительный покров значительной части ТЕР покрыт слоем воды, а относительно сомкнутая растительность (проективное покрытие от 50 до 100 %) начинается на некотором удалении от уреза воды. Таким образом, большая или меньшая обводнённость площади ТЕР приозёрных понижений обуславливает и более низкие значения вегетационного индекса.

Наибольшие значения NDVI отмечены для классов ТЕР плоских слабодренированных террас (4) и проточных понижений водоразделов (7). Это может быть связано с тем, что для растительных сообществ данных типов ТЕР характерно преобладание кустарниковых ив и карликовой берёзки (*Salix glauca*, *S. lanata*, *Betula nana*) с большей зелёной фитомассой.

Межгодовая динамика вегетационного индекса NDVI

Анализ динамики сезонной изменчивости индекса NDVI для разных классов ТЕР показал наибольшие различия между ними в период начала вегетации, тогда как при достижении максимальных значений эти различия существенно сглаживаются. В связи с этим особый интерес представляет изучение межгодовой динамики вегетационного индекса для разных классов ТЕР в начальный период вегетации как отражение реагирования разных типов сообществ на межгодовые колебания макроклиматических факторов, общие для всей территории.

Сравнительный анализ межгодовых показателей NDVI в этот период вегетации показал, что для ключевого участка прослеживается общая тенденция снижения значения NDVI с 2000 г. для разных классов ТЕР (рис. 3). При этом были отмечены значительные межгодовые колебания величин индекса. Так, в 2007 г. среднее значение NDVI составило 0,53 — это на 0,17 выше, чем в 2000 г., что свидетельствует о более раннем начале вегетации. За последние 3–4 года амплитуда межгодовых колебаний индекса уменьшается, а тренд на понижение прослеживается более отчётливо.

Рис. 3. Показатели вегетационного индекса исследуемого участка в разные годы для разных классов ТЕР

Вместе с тем различия между классами в целом сохраняются, что свидетельствует об относительно однотипной реакции разных сообществ на межгодовые колебания погодных условий. Исключение составляют два последних года, в течение которых зарегистрированы наиболее существенные различия между классами ТЕР, что, по-видимому, отчётливо свидетельствует о сдвиге сроков начала вегетации в эти годы на более ранние стадии. Это согласуется с данными, полученными ранее Лавриненко И. А. и Лавриненко О. В. (2018) по островам Вайгач и Колгуев: пик вегетации сместился с середины — второй половины июля (1980-е гг.) на начало — первую половину августа к 2010 г.

Заключение

Анализ сезонной динамики индекса NDVI для разных классов территориальных единиц растительности на ключевом участке возвышенности Вангуреймусюр (Большеземельская тундра) показал, что наибольшие различия между показателями индекса прослеживаются в период с середины июня до середины июля. В конце июля — начале августа при достижении максимальных значений индекса наблюдается сближение этих показателей, и пик вегетации для всех классов приходится на конец июля — начало августа. Наименьшие значения индекса были отмечены для отдела фитоценозов речных долин, а в отделе водоразделов — для класса приозёрных понижений. Максимальные значения NDVI отмечены для классов плоских слабодренированных террас и проточных понижений водоразделов.

Сравнительный анализ межгодовых показателей NDVI за начальный период вегетации показал общую тенденцию снижения значений индекса для разных классов ТЕР за последние два десятилетия при сохранении различий между классами. Установлено, что за последние годы амплитуда межгодовых колебаний индекса снижается, а тренд на понижение прослеживается более отчётливо. Так, за 2017–2018 гг. зарегистрированы наиболее существенные различия между классами ТЕР, что свидетельствует о сдвиге сроков начала вегетации в эти годы на более ранние стадии.

Работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН по теме № AAAA-A19-119032090096-4. Автор благодарит директора Государственного природного заповедника «Ненецкий» С.А. Золотого за помощь в организации экспедиционных работ, искренне признателен руководству нефтяной компании ООО «Варандейский терминал» за доставку отряда вертолётом к месту работы на возвышенности Вангуреймусюр.

Автор выражает глубокую благодарность коллегам А.Г. Кочергиной и В.В. Нешатаеву (Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН) за содействие при проведении полевых работ, О.В. Лавриненко (*там же*) за помощь при выполнении и обработке геоботанических описаний. Автор также благодарит И.А. Лавриненко за существенные замечания и советы при проведении исследований и подготовке настоящей статьи.

Литература

1. Грибова С. А., Исаченко Т. И. Картирование растительности в съёмочных масштабах // Полевая геоботаника. 1972. Т. 4. С. 137–330.
2. Лавриненко И. А. Геоботаническое районирование Большеземельской тундры и прилегающих территорий // Геоботаническое картографирование. 2013. С. 74.
3. Лавриненко И. А. Типология территориальных единиц растительности для целей крупномасштабного картографирования (на примере острова Колгуев) // Геоботаническое картографирование. 2015. С. 95–119.
4. Лавриненко И. А. Подход к типологии единиц растительности для CAVM на основе фитосоциологических данных // Международный семинар «AVA — Арктическое биоразнообразие и функционирование экосистем»: сб. тез. Архангельск: САФУ, 2019. С. 37–39.
5. Лавриненко И. А., Лавриненко О. В. Зональная растительность равнинных восточноевропейских тундр // Растительность России. 2018. № 32. С. 35–108.
6. Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K., Bieniek P. A., Epstein H. E., Comiso J. C., Pinzon J. E., Tucker C. J., Steele M., Ermold W. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environmental Research Letters. 2017. V. 12. No. 5. P. 055003.
7. Blok D., Schaepman-Strub G., Bartholomeus H., Heijmans M. M., Maximov T. C., Berendse F. The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature // Environmental Research Letters. 2011. V. 6. No. 3. P. 035502.
8. Bratsch S. N., Epstein H. E., Buchhorn M., Walker D. A. Differentiating among four Arctic tundra plant communities at Ivotuk, Alaska using field spectroscopy // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 1. P. 51.
9. Delbosc P., Bacchetta G., Gonçalves J.-C., Bioret F., Panaiotis Ch., Lalanne A., Pedrotti F., Bouillet V., Sawtchuk J. Phytosociologie dynamico-catenale des végétations de la Corse: methodologies typologique et cartographique // Géographie. Brest: Université de Bretagne occidentale, 2015. 748 p.

10. *Delbosc P., Bioret F., Panaïotis Ch.* Subhalophilous and halophilous geopermaseries and minoriseries of sandy and sandy gravel systems of Corsica: typology, bionomy and sequential analysis vegetation // Intern. J. Geobotanical Research. 2016. V. 6. P. 9–26.
11. *Delbosc P., Bioret F., Panaïotis Ch.* Dynamic-catenal phytosociological mapping of Corsica: inductive methodological approach // Contribuții Botanice. 2017. V. LII. P. 29–54.
12. *Epstein H. E., Raynolds M. K., Walker D. A., Bhatt U. S., Tucker C. J., Pinzon J. E.* Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades // Environmental Research Letters. 2012. V. 7. No. 1. P. 015506.
13. *Epstein H. E., Myers-Smith I., Walker D. A.* Recent dynamics of arctic and sub-arctic vegetation // Environmental Research Letters. 2013. V. 8. No. 1. P. 015040.
14. *Fraser R. H., Lantz T. C., Olthof I., Kokelj S. V., Sims R. A.* Warming-induced shrub expansion and lichen decline in the Western Canadian Arctic // Ecosystems. 2014. V. 17. No. 7. P. 1151–1168.
15. *Kennedy R. E.* New views on changing Arctic vegetation // Environmental Research Letters. 2012. V. 7. No. 1. P. 011001.
16. *Laidler G. J., Treitz P. M., Atkinson D. M.* Remote sensing of Arctic vegetation: relations between the NDVI, spatial resolution and vegetation cover on Boothia Peninsula, Nunavut // Arctic. 2008. P. 1–13.
17. *Leibman M. O., Moskalenko N. G., Orekhov P. T., Khomutov A. V., Gameev I. A., Khitun O. V., Walker D. A., Epstein H. E.* Interrelation of cryogenic and biotic components of geosystems in cryolithozone of West Siberia on the Transect “Yamal” // Polar Cryosphere of Water and Land. 2011. P. 171–192.
18. *May J. L., Healey N. C., Ahrends H. E., Hollister R. D., Tweedie C. E., Welker J. M., Gould W. A., Oberbauer S. F.* Short-Term Impacts of the Air Temperature on Greening and Senescence in Alaskan Arctic Plant Tundra Habitats // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 12. P. 1338.
19. *Myers-Smith I. H., Elmendorf S. C., Beck P. S., Wilkening M., Hallinger M., Blok D., Tape K. D., Rayback S. A., Macias-Fauria M., Forbes B. C., Speed J. D.* Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome // Nature Climate Change. 2015. V. 5. No. 9. P. 887.
20. *Park T., Ganguly S., Tømmervik H., Euskirchen E. S., Høgda K.-A., Karlsen S. R., Brovkin V., Nemani R. R., Myneni R. B.* Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data // Environmental Research Letters. 2016. V. 11. No. 8. P. 084001.
21. *Pouliot D., Latifovic R., Olthof I.* Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985–2006 // Intern. J. Remote Sensing. 2009. V. 30. No. 1. P. 149–168.
22. *Raynolds M. K., Walker D. A.* Increased wetness confounds Landsat-derived NDVI trends in the central Alaska North Slope region, 1985–2011 // Environmental Research Letters. 2016. V. 11(8). P. 085004.
23. *Raynolds M. K., Walker D. A., Verbyla D., Munger C. A.* Patterns of change within a tundra landscape: 22-year Landsat NDVI trends in an area of the northern foothills of the Brooks Range, Alaska // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2013. V. 45. No. 2. P. 249–260.
24. *Savio L., Gaudillat V., Poncet L.* Enquête sur les besoins en termes de végétation et d'habitats en France. Synthèse et analyse au regard du programme CarHAB. Rapport SPN 2015/34. MNHN-DIREV-SPN. MEDDE. Paris, 2015. 90 p.
25. *Walker D. A., Leibman M. O., Epstein H. E., Forbes B. C., Bhatt U. S., Raynolds M. K., Comiso J. C., Gubarkov A. A., Kaarlejärvi E.* Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index // Environmental Research Letters. 2009. V. 4. No 4. P. 045004.

Dynamics of NDVI for different classes of territorial units of typical tundra vegetation

K. V. Ivanova

Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg 197376, Russia

The vegetation cover of the tundra zone clearly reacts to variations in climatic conditions. This paper discusses, using satellite images, the seasonal dynamics of 2017–2018 vegetative index (Sentinel-2A) and interannual NDVI dynamics (Landsat 5, 8) in the initial vegetation period on the territory of the Vangureymusyur elevation (Bolshezemelskaya Tundra, Nenets Autonomous Okrug) which belongs to the subzone of typical tundra. The greatest differences between the indices of the index for different classes of territorial units of vegetation (TUV) can be traced from mid-June to mid-July. At the end of

July and beginning of August, when the maximum values of the index are reached, these indicators are converging, and the peak of the growing season for all classes is at the end of July and the beginning of August. The maximum NDVI values are noted for the TUV classes of flat, poorly drained terraces and flowing depressions of the watersheds, the minimum for the river valleys department, and in the section of water sections for the class of near-lake depressions. A comparative analysis of the interannual NDVI indicators for the initial growing season showed a general tendency for the index values to decline over the past two decades, i.e., a decrease in the accumulation of aboveground green phytomass, while the differences between the TUV classes remain. The results obtained indicate a shift in the timing of the beginning of the growing season, which is confirmed by the work of a number of Russian and foreign researchers.

Keywords: vegetation, territorial units of vegetation, dynamics of NDVI, Arctic, East European tundra

Accepted: 04.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-194-202

References

1. Gribova S. A., Isachenko T. I., Kartirovanie rastitel'nosti v s''emochnykh masshtabakh (Mapping of vegetation at shooting scales), *Polevaya geobotanika*, 1972, Vol. 4, pp. 137–330.
2. Lavrinenko I. A., Geobotanicheskoe raionirovanie Bol'shezemel'skoi tundry i prilgayushchikh territorii (Geobotanical zoning of Bolshezemelskaya tundra and adjacent territories), *Geobotanicheskoe kartografirovaniye*, Saint Petersburg, 2013, p. 74.
3. Lavrinenko I. A., Tipologiya territorial'nykh edinits rastitel'nosti dlya tselei krupnomasshtabnogo kartografirovaniya (na primere ostrova Kolguev) (Typological scheme of the territorial units of vegetation on the example of Kolguev Island), *Geobotanicheskoe kartografirovaniye*, 2015, pp. 95–119.
4. Lavrinenko I. A., Podkhod k tipologii edinits rastitel'nosti dlya CAVM na osnove fitosotsiologicheskikh dannykh (Approach to the typology of vegetation units for CAVM based on phytosociological data), *Mezhdunarodnyi seminar "AVA — Arkticheskoe bioraznoobrazie i funktsionirovanie ekosistem"* (AVA — Arctic Biodiversity and Ecosystem Functioning workshop), Book of Abstracts, Arkhangelsk, 2019, pp. 37–39.
5. Lavrinenko I. A., Lavrinenko O. V., Zonal'naya rastitel'nost' ravninnykh vostochnoevropeskikh tundr (Zonal vegetation of flat eastern European tundras), *Rastitel'nost' Rossii*, 2018, No. 32, pp. 35–108.
6. Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K., Bieniek P. A., Epstein H. E., Comiso J. C., Pinzon J. E., Tucker C. J., Steele M., Ermold W., Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables, *Environmental Research Letters*, 2017, Vol. 12, No. 5, p. 055003.
7. Blok D., Schaepman-Strub G., Bartholomeus H., Heijmans M. M., Maximov T. C., Berendse F., The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature, *Environmental Research Letters*, 2011, Vol. 6, No. 3, p. 035502.
8. Bratsch S. N., Epstein H. E., Buchhorn M., Walker D. A., Differentiating among four Arctic tundra plant communities at Ivotuk, Alaska using field spectroscopy, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 1, p. 51.
9. Delbosc P., Bacchetta G., Gonçalves J.-C., Bioret F., Panaïotis Ch., Lalanne A., Pedrotti F., Boullet V., Sawtschuk J., Phytosociologie dynamico-catenale des vegetations de la Corse: methodologies typologique et cartographique, *Geographie*, Brest, Universite de Bretagne occidentale, 2015, 748 p.
10. Delbosc P., Bioret F., Panaïotis Ch., Subhalophilous and halophilous geopermaseries and minoriseries of sandy and sandy gravel systems of Corsica: typology, bionomy and sequential analysis vegetation, *Intern. J. Geobotanical Research*, 2016, Vol. 6, pp. 9–26.
11. Delbosc P., Bioret F., Panaïotis Ch., Dynamic-catenal phytosociological mapping of Corsica: inductive methodological approach, *Contribuții Botanice*, 2017, Vol. LII, pp. 29–54.
12. Epstein H. E., Raynolds M. K., Walker D. A., Bhatt U. S., Tucker C. J., Pinzon J. E., Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades, *Environmental Research Letters*, 2012, Vol. 7, No. 1, p. 015506.
13. Epstein H. E., Myers-Smith I., Walker D. A., Recent dynamics of arctic and sub-arctic vegetation, *Environmental Research Letters*, 2013, Vol. 8, No. 1, p. 015040.
14. Fraser R. H., Lantz T. C., Olthof I., Kokelj S. V., Sims R. A., Warming-induced shrub expansion and lichen decline in the Western Canadian Arctic, *Ecosystems*, 2014, Vol. 17, No. 7, pp. 1151–1168.
15. Kennedy R. E., New views on changing Arctic vegetation, *Environmental Research Letters*, 2012, Vol. 7, No. 1, p. 011001.
16. Laidler G. J., Treitz P. M., Atkinson D. M., Remote sensing of Arctic vegetation: relations between the NDVI, spatial resolution and vegetation cover on Boothia Peninsula, *Nunavut, Arctic*, 2008, pp. 1–13.

17. Leibman M. O., Moskalenko N. G., Orekhov P. T., Khomutov A. V., Gameev I. A., Khitun O. V., Walker D. A., Epstein H. E., Interrelation of cryogenic and biotic components of geosystems in cryolithozone of West Siberia on the Transect "Yamal", *Polar cryosphere of water and land*, 2011, pp. 171–192.
18. May J. L., Healey N. C., Ahrends H. E., Hollister R. D., Tweedie C. E., Welker J. M., Gould W. A., Oberbauer S. F., Short-Term Impacts of the Air Temperature on Greening and Senescence in Alaskan Arctic Plant Tundra Habitats, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 12, p. 1338.
19. Myers-Smith I. H., Elmendorf S. C., Beck P. S., Wilmking M., Hallinger M., Blok D., Tape K. D., Rayback S. A., Macias-Fauria M., Forbes B. C., Speed J. D., Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome, *Nature Climate Change*, 2015, Vol. 5, No. 9, p. 887.
20. Park T., Ganguly S., Tømmervik H., Euskirchen E. S., Høgda K.-A., Karlsen S. R., Brovkin V., Nemani R. R., Myneni R. B., Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data, *Environmental Research Letters*, 2016, Vol. 11, No. 8, p. 084001.
21. Pouliot D., Latifovic R., Olthof I., Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985–2006, *Intern. J. Remote Sensing*, 2009, Vol. 30, No. 1, pp. 149–168.
22. Raynolds M. K., Walker D. A., Increased wetness confounds Landsat-derived NDVI trends in the central Alaska North Slope region, 1985–2011, *Environmental Research Letters*, 2016, Vol. 11, No. 8, p. 085004.
23. Raynolds M. K., Walker D. A., Verbyla D., Munger C. A., Patterns of change within a tundra landscape: 22-year Landsat NDVI trends in an area of the northern foothills of the Brooks Range, *Alaska, Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2013, Vol. 45, No. 2, pp. 249–260.
24. Savio L., Gaudillat V., Poncet L., *Enquête sur les besoins en termes de végétation et d'habitats en France, Synthèse et analyse au regard du programme CarHAB*, Rapport SPN 2015/34, MNHN-DIREV-SPN, MEDDE, Paris, 2015, 90 p.
25. Walker D. A., Leibman M. O., Epstein H. E., Forbes B. C., Bhatt U. S., Raynolds M. K., Comiso J. C., Gubarkov A. A., Kaarlejärvi E., Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index, *Environmental Research Letters*, 2009, Vol. 4, No. 4, p. 045004.