

УДК 528.8

## Исследование вариаций индекса NDVI тундровой и таежной зон Восточной Сибири на примере территории Якутии

Е.В. Варламова, В.С. Соловьев\*

*Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН  
677980, г. Якутск, пр. Ленина, 31*

Поступила в редакцию 26.05.2014 г.

По данным дистанционного зондирования (искусственный спутник Земли Spot Vegetation, 1998–2012) проведены исследования сезонных и межгодовых вариаций индекса NDVI тундровой и таежной зон на территории Якутии. Сделан корреляционный анализ показателей NDVI и температуры воздуха исследуемых участков, а также рассмотрены их тренды изменений.

*Ключевые слова:* вегетационный индекс, дистанционное зондирование, Восточная Сибирь, Якутия; vegetation index, remote sensing, Eastern Siberia, Yakutia.

### Введение

В условиях глобального потепления климата мониторинг изменений природной среды Арктики и прилегающих территорий является одной из наиболее актуальных задач экологии. Как важнейший компонент биосферы и источник ресурсов растительный покров является чувствительным «индикатором» изменений в биосфере и климате.

В условиях труднодоступности и обширности значительной части территории арктической зоны методы дистанционного зондирования позволяют получать неопределимую информацию о состоянии окружающей среды и обеспечивают высокий уровень достоверности и регулярности измерений ключевых параметров.

Работы по исследованию растительного покрова с использованием методов дистанционного зондирования ведутся давно как в России, так и за рубежом [1–9]. По данным спутниковых и наземных наблюдений показано, что в последние десятилетия в ряде регионов произошли заметные сдвиги сроков фенологических событий у растений, которые связывают с повышением температуры воздуха [10–13]. В работах [14, 15] отмечается, что в целом за последние 30 лет на северных широтах наблюдается тенденция роста вегетационного индекса NDVI.

В настоящей статье рассмотрены сезонные и годовые изменения индекса NDVI тундровой и таежной зон Восточной Сибири на примере территории Якутии по спутниковым данным.

### Данные и методика исследований

Для оценки состояния растительности по данным дистанционного зондирования широко используются вегетационные индексы. Одним из наиболее распространенных является нормализованный относительный индекс растительности NDVI, рассчитываемый по формуле

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

где NIR и RED – альbedo земной поверхности в ближнем ИК- и красном диапазонах спектра соответственно [16]. Из наиболее распространенных вегетационных индексов NDVI имеет самый широкий динамический диапазон и лучшую чувствительность к изменениям в растительном покрове.

В эксперименте использован набор 10-дневных значений NDVI (продукт VGT-s10), построенный по данным спутника Spot Vegetation за период 1998–2012 гг. [17]. Вариации среднесуточной температуры воздуха, температуры почвы на разной глубине получены из открытых источников данных метеостанций Росгидромета. Для оценки изменений сезонного хода температуры почвы были использованы суточные значения температуры на разных глубинах, полученные с помощью почвенно-глубинных термометров на метеостанции «Якутск» (62,02° с.ш., 129,72° в.д.) [18].

В зоне распространения многолетней мерзлоты в Восточной Сибири были выбраны четыре приблизительно одинаковых участка (~50 × 50 км) в различных широтных зонах (рис. 1). Расположение и размер тестовых участков выбирались с условием

\* Евгения Викторовна Варламова (varlamova1@ikfia.sbras.ru); Владимир Степанович Соловьев (solovyev@ikfia.sbras.ru).

однородности видового состава по типу растительности, ровного (низменного) рельефа и отсутствия крупных водных объектов. На рис. 1 показано географическое расположение участков, обозначенных соответственно буквами С (северный), З (западный), Ц (центральный) и Ю (южный). Участку С и З соответствует тундровый (кустарниковый) тип растительности, на участках Ц и Ю, расположенных в таежной зоне, доминирует лиственница даурская, относящаяся к хвойным листопадным типам растительности.

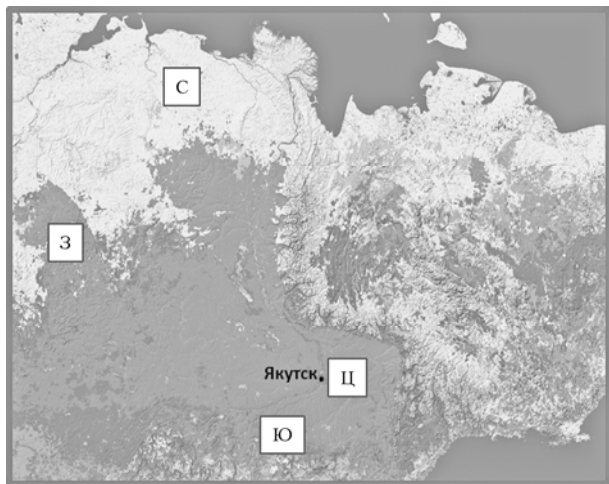


Рис. 1. Схема расположения тестовых участков С, З, Ц и Ю

Следует отметить, что выбранные участки расположены на низменном рельефе местности. Участок Ц расположен на Лено-Амгинском междуречье, который является наиболее засушливым районом Якутии. Годовое количество осадков составляет не более 200–220 мм, что согласно климатической классификации относит эту территорию к зоне полупустынь. Высокие летние температуры воздуха (июль, 35–40 °С) вызывают иссушающий эффект подстилающей поверхности, а наличие большого количества термокарстовых котловин оказывает значительное влияние на формирование водного баланса этой территории. Снежный покров образуется в октябре и держится в течение более 7 мес (в среднем 205–215 дней). На территории участка Ю климат также резко континентальный, но значительно мягче, чем в Центральной Якутии: зимой теплее, летом прохладнее, количество осадков втрое больше, снежный покров формируется уже в сентябре.

В условиях сухого климата Центральной Якутии в летний период в результате частичного оттаивания многолетней мерзлоты происходит дополнительное влагообеспечение древесной растительности. Глубина сезонного оттаивания в центральной части Якутии колеблется от 0,6 до 2,5 м в зависимости от рельефа, литологии, экспозиции и растительного покрова местности [19]. Для тундровой зоны глубина сезонного оттаивания почвы составляет около 15–40 см [20].

## Обсуждение результатов исследования

По исходным наборам данных для тестовых участков были построены графики сезонных вариаций индекса NDVI и сопутствующие метеорологические показатели. На рис. 2 показан сезонный ход NDVI и температуры воздуха на тестовых участках С и З, расположенных за Полярным кругом.

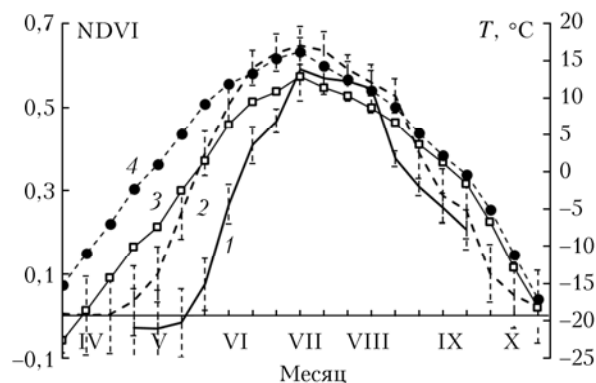


Рис. 2. Сезонный ход NDVI и температуры воздуха на тестовых участках С и З: кривая 1 – NDVI участка С; 2 – NDVI участка З; 3 – температура участка С; 4 – температура участка З

Сезонная динамика индекса растительности (см. рис. 2) хорошо согласуется с температурой воздуха: фазы роста, максимума и спада обеих кривых практически совпадают по срокам. Рост NDVI тут же сменяется спадом вслед за снижением температуры. Различия в начале роста NDVI и в абсолютных значениях между участками С и З объясняются разницей температурных режимов обоих участков. В целом сезонный график изменения индекса NDVI на северных участках имеет «куполообразный» вид.

Особенности сезонного хода индекса NDVI на «южных» участках (Ц, Ю) представлены на рис. 3.

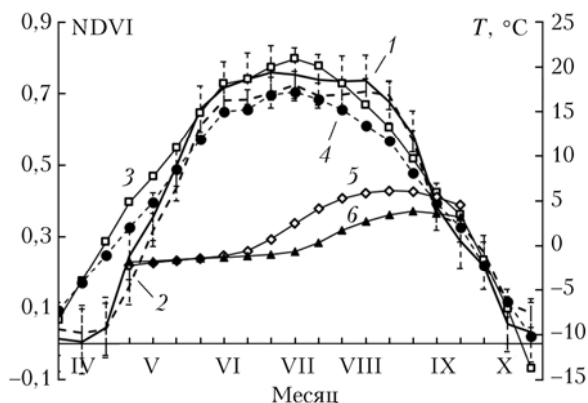


Рис. 3. Сезонный ход NDVI, температуры воздуха на тестовых участках Ц и Ю и температуры почвы участка Ц: кривая 1 – NDVI участка Ц; 2 – NDVI участка Ю; 3 – температура участка Ц; 4 – температура участка Ю; 5 – температура почвы на глубине 120 см; 6 – температура почвы на глубине 160 см

Сезонный ход индекса NDVI участков Ц и Ю имеет ярко выраженную «трапецевидную» форму с длительной фазой насыщения, характер температурных кривых иной – достигнув максимума к первой декаде июля, температура воздуха начинает снижаться. Индекс NDVI после прохождения температурного максимума воздуха не снижается, сохраняя ранее достигнутые значения, более того, в отдельные годы наблюдается небольшой его рост к концу июля. Такую особенность в сезонном поведении NDVI в Центральной Якутии в условиях низкого уровня летних осадков можно объяснить оттаиванием многолетнемерзлых пород во второй половине лета, что обеспечивает достаточный уровень влагосодержания почв для роста/поддержания растительности. Динамика оттайки почв на участке Ц показана на рис. 3 кривыми 5 и 6. Оттаивание почвы на глубине 120 см (кривая 5) начинается к концу июня, максимум температуры наступает во второй декаде августа. Положительные температуры почвы на глубине 160 см (кривая 6) наступают к концу июля.

Межгодовые изменения сезонных (май–сентябрь) показателей NDVI, температуры воздуха и тренды представлены на рис. 4.

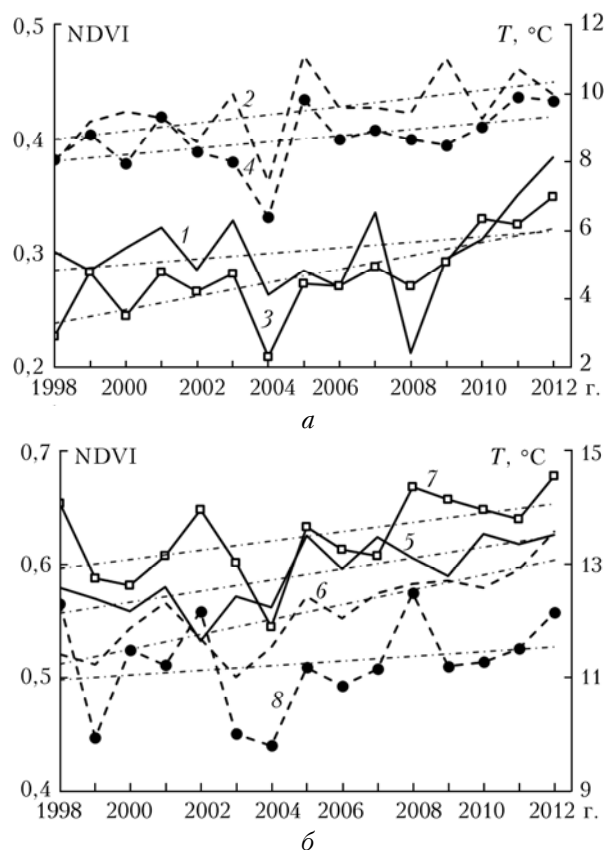


Рис. 4. Межгодовые вариации сезонных (май–сентябрь) NDVI и температуры воздуха: а – кривая 1 – NDVI участка С; 2 – NDVI участка З; 3 – температура участка С; 4 – температура участка З; б – 5 – NDVI участка Ц; 6 – NDVI участка Ю; 7 – температура участка Ц; 8 – температура участка Ю. Тренды вариаций NDVI и температуры (кривые 1–8) показаны штрихпунктирными линиями

Межгодовые колебания NDVI имеют изменчивый характер. Тем не менее общей для всех тестовых участков является тенденция роста NDVI на фоне повышения температуры воздуха. Прирост вегетационного индекса (1998–2012 гг.) для участков С и З составил ~4–5%, а для участков Ц и Ю ~7–10%.

Отмечается неплохое согласие вариаций температуры воздуха и значений NDVI для участков С и З. Для участков Ц и Ю корреляция практически не наблюдается. Рассчитанные коэффициенты корреляции межгодовых вариаций температуры воздуха и индекса NDVI составили 0,6; 0,7; 0,4 и 0,5 для участков С, З, Ц и Ю соответственно. Хорошая связь индекса NDVI с температурой на участках Ц и Ю с коэффициентом корреляции 0,8 наблюдается только на фазе роста вегетации, в мае, далее в ходе вегетационного сезона корреляция резко снижается.

### Заключение

Короткое холодное лето и низкий уровень годовых осадков Заполярья определяют быстротечность периода вегетации растительного покрова. Доминирующим фактором формирования сезонного хода индекса NDVI является температура приземного слоя воздуха.

Сезонное поведение NDVI в Центральной Якутии, где средний показатель осадков за летние месяцы составляет около 100 мм (согласно данным Росгидромета), но летние температуры достаточно высоки (в июле столбик термометра нередко достигает отметки +40 °C), обусловлено как температурным режимом воздуха, так и оттайкой многолетнемерзлых пород во второй половине лета, что ведет к насыщению влагой верхних слоев почвы и, соответственно, к увеличению длительности фазы максимума растительного покрова.

Общей для всех тестовых участков является тенденция роста NDVI на фоне повышения температуры воздуха. Прирост вегетационного индекса за 1982–2012 гг. составил ~4–5% для участков С и З и ~7–10% для Ц и Ю. Коэффициент корреляции межгодовых вариаций NDVI с температурой воздуха на участках С и З равен ~0,6 и 0,7, а на участках Ц и Ю ~0,4 и 0,5 соответственно.

1. Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., Isaev A.S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia // Int. J. Remote Sens. 2003. V. 24, N 9. P. 1977–1982.
2. Барталев С.А., Лулян Е.А. Спутниковый мониторинг бореальных экосистем // Природа. 2005. № 9. С. 44–53.
3. Харин Н.Г., Журин В.М., Татейшии Р. Возможности использования вегетационного индекса (NDVI) для изучения фенологии и состава лесов России // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 1. С. 73–79.
4. Varlamova E.V., Vasiliev M.S., Budishchev A.A. Research of vegetation index of northeast Yakutia on NOAA satellite data // Proc. Int. WS on C/H<sub>2</sub>O/Energy balance and climate over boreal regions with special emphasis on eastern Eurasia. 14–16 July, 2008. Yakutsk, Russia. Published in Nagoya University, Japan. 2009. P. 123–126.

5. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование вариаций вегетационного индекса растительного покрова Арктической зоны Якутии // XVII Междунар. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: Сб. трудов [Электронный ресурс]. Электрон. текстовые, граф. данные. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. С. 22–25.
6. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование динамики индекса растительности арктической зоны Восточной Сибири по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 65–70.
7. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Мониторинг растительного покрова арктической зоны Восточной Сибири по спутниковым данным // Наука и образование. 2012. № 2(66). С. 58–62.
8. Zhou L., Tucker C.J., Kaufmann R.K., Slayback D., Shabanov N.V., Myneni R.B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 // J. Geophys. Res. A. 2001. V. 106, iss. 17. P. 20069–20083.
9. Sobrino J.A., Julien Y. Global trends in NDVI-derived parameters obtained from GIMMS data // Int. J. Remote Sens. 2011. V. 32, iss. 15. P. 4267–4279.
10. White M.A., De Beurs K.M., Didan K., Inouye D.W., Richardson A.D., Jensen O.P., O'Keefe J., Zhang G., Nemani R.R., van Leeuwen W.J.D., Brown J.F., de Wit A., Schaepman M., Lin X., Dettinger M., Bailey A.S., Kimball J., Schwartz M.D., Baldocchi D.D., Lee J.T., Lauenroth W.K. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006 // Glob. Change Biol. 2009. V. 15, iss. 10. P. 2335–2359.
11. Delbart N., Picard G., Le Toans T., Kergoat L., Quegan S., Woodward I., Dye D., Fedotova V. Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale // Glob. Change Biol. 2008. V. 14, iss. 3. P. 603–614.
12. 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. Biometeorol. 2008. V. 52, iss. 4. P. 251–259.
13. Menzel A., Fabian P. Growing season extended in Europe // Nature (Gr. Brit.). 1999. V. 397, iss. 6721. P. 659–659.
14. 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. V. 45, iss. 4. P. 184–190.
15. 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 Sens. 2013. V. 5, iss. 10. P. 4799–4818.
16. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // 3rd ERTS Symposium. NASA. 1973. SP-351 I. P. 309–317.
17. VEGETATION portal. URL: <http://www.spot-vegetation.com> (дата обращения: 27.02.2014).
18. Сервер ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»: специализированные массивы. URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 27.02.2014).
19. Федоров А.Н., Ивахана Г., Константинов П.Я., Мачишмура Т., Аргунов Р.Н., Ефремов П.В., Лопез Л.М., Такакай Ф., Петров М.И. Изменчивость мерзлотно-ландшафтных условий после сплошной вырубki в Центральной Якутии // Междунар. журн. прикл. и фундамент. исслед. 2013. № 8. С. 89–91.
20. Любомиров А.С. Исследование устойчивости природных комплексов в тундрах Якутии в свете проблем термокарста // Вестн. ЯГУ. 2005. Т. 2, № 3. С. 49–56.

*E.V. Varlamova, V.S. Solovyev. Study of NDVI variations at tundra and taiga areas of Eastern Siberia (Yakutia).*

Research of seasonal and annual NDVI variations at tundra and taiga areas of Yakutia by remote sensing data (Spot Vegetation, 1998–2012) is made. The correlation analysis between NDVI and air temperature values, along with trend analysis for studied sites are made.