Зональная неоднородность отклика растительности в период активной вегетации на изменчивость весеннего метеорологического режима Восточно-Европейской равнины

Л. М. Китаев, Т. Б. Титкова

Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: lkitaev@mail.ru

Проведена оценка реакции растительности в период начала активной фазы вегетации (апрель—июнь) на изменчивость предвесеннего и весеннего метеорологического режима. Анализ проведён с использованием продукта MOD13A2 версии 6, содержащего значения вегетационного индекса NDVI — как эквивалента количества фитомассы (по данным MODIS/Terra), а также с привлечением результатов наблюдений метеорологических станций Росгидромета. Получены зональные закономерности пространственного соотношения изменчивости значений NDVI с приземной температурой воздуха, суммарными осадками и максимальным снегозапасом. Максимальные значения NDVI характерны для центра региона (смешанные и широколиственные леса) со средними для территории температурами воздуха и значительными суммарными осадками и максимальным снегозапасом. На основе анализа регрессионных уравнений выявлены зональные различия соотношений многолетнего хода значений NDVI и каждой метеорологической характеристики: существенный рост значений NDVI при росте приземной температуры воздуха происходит в тундре, при увеличении суммарных осадков и снегозапаса — в лесостепях и степях. Наибольшее значение для многолетней изменчивости значений NDVI в период активной вегетации повсеместно имеет ход приземной температуры воздуха, затем суммарные осадки и снегозапас — лишь для тундры, лесостепи и степей.

Ключевые слова: вегетационный индекс NDVI, приземная температура воздуха, суммарные осадки, период активной вегетации, регрессионные зависимости, многолетние тенденции, пространственная изменчивость

Одобрена к печати: 13.12.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-165-173

Введение

В условиях продолжающегося потепления последних десятилетий важным направлением в исследованиях окружающей среды остаётся изучение изменчивости взаимодействия метеорологического режима и процессов на поверхности суши. Одним из основных показателей состояния экосистем считается продуктивность растительного покрова, определяемая в значительной степени региональными особенностями климата. Так, в частности, существенная трансформация растительных сообществ наблюдается в пределах Арктики и Субарктики, где в последние годы особенно ярко усиливается процесс повышения температуры воздуха (Титкова, Виноградова, 2015; Тишков и др., 2021; Sandler'skiy, Puzachenko, 2011 и др.); одновременно происходят заметная деградация растительного покрова и опустынивание на юге Восточно-Европейской равнины (Золотокрылин, Титкова, 2011; Куст..., 2019).

Отклик растительности на изменения климата исследуется в настоящий момент в двух направлениях: для конкретных видов и для растительных сообществ на региональном уровне. В последнем случае в анализе применяется ряд интегральных показателей, в частности LAI (*англ.* Leaf Area Index — индекс листовой поверхности) и FPAR (*англ.* Fraction of Photosynthetically Active Radiation — индекс фотосинтетической активной радиации). Среди вегетационных индексов, получаемых при анализе данных дистанционного зондирования (пассивное микроволновое излучение разных диапазонов), наиболее известен показатель NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс); динамика его значений позволяет оценить интенсивность фотосинтеза,

активность и изменчивость надземной фитомассы — как эквивалент продуктивности растительного покрова (Тишков и др., 2021; Beck et al., 2006; Walker et al., 2012 и др.).

Современные исследования состояния растительности с использованием значений NDVI в значительной мере относятся к крупномасштабным оценкам изменчивости, причём в большинстве случаев рассматриваются осреднённые за весь вегетационный период значения индекса и только для сезона с приземной температурой воздуха выше $+6^{\circ}\text{C}$ — без учёта особенностей функционирования криофитов, психрофитов, холодоустойчивых видов древесной растительности, вегетационная активность которых начинается уже при околонулевой температуре весеннего периода. Наряду с многочисленными выводами о влиянии на вегетацию метеорологического режима существуют также упоминания о значимости для сезонного роста фитомассы запасов воды в снежном покрове как фактора интенсивного увлажнения почвы в весенний период — при отсутствии тем не менее количественных оценок предполагаемой взаимосвязи. В связи с чем целью наших исследований следует считать оценку реакции растительности в период активной фазы вегетации (апрель — июнь) на изменчивость предвесеннего и весеннего метеорологического режима — на основе анализа зональных различий NDVI Восточно-Европейской равнины.

Исходные данные и методические подходы

Пространственно-временная изменчивость растительного покрова анализировалась с использованием продукта MOD13A2 (версия 6), содержащего значения NDVI по данным MODIS/Terra (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Didan et al., 2015). Даная версия, по определению разработчиков, адаптирована для исследований растительного покрова в высоких и средних широтах. Архив, открытый в 2000 г., содержит безоблачные пространственные композиты месячных данных, осреднённых по исходным суточным измерениям с пространственным разрешением CMG (*англ.* climate modelling grid) $0,05 \times 0,05^{\circ}$ (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD13A2#product-information>). Значения индекса привязаны в соответствующих ячейках к местоположению 181-й метеорологической станции системы Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), данные наблюдений которой используются для анализа: суточные значения приземной температуры воздуха и осадки, а также максимальный снеговой запас (или водный эквивалент снежного покрова, SWE (*англ.* snow-water equivalent)) — для периода 2000–2019 гг. (<http://meteo.ru/>). В отличие от имеющихся на сегодня методических подходов исследуемый нами период активной вегетации как период активного роста и развития растений (Щукин..., 1980) охватывает значения приземной температуры воздуха ниже $+6^{\circ}\text{C}$. Анализируются значения NDVI июля, средние и суммарные значения приземной температуры воздуха апреля, апреля — мая, апреля — июня и апреля — июля, а также максимальные значения снегового запаса. В этом случае уточняется временная структура отклика растительности в начальную фазу роста фитомассы на особенности метеорологического режима весеннего периода и проверяется наличие прямой зависимости вегетационной активности с величиной снегового запаса — с учётом функционирования холодоустойчивых растений, продуктивность которых значима при температуре ниже $+6^{\circ}\text{C}$. Пространственная неоднородность взаимосвязи рассматриваемых характеристик исследуется сравнением их зональных особенностей в соответствии с районированием А. Г. Исаченко (Исаченко, Шляпников, 1989) — для тундры и лесотундры, тайги, смешанных лесов, широколиственных лесов, лесостепи, степи. Возможность рассмотрения особенностей вегетации в холодных условиях тундры в апреле — июле (аналогично другим ландшафтным зонам) связана с небольшой здесь толщиной снежного покрова в зимний период (5–40 см), появлением проталин уже в конце апреля, наличием холодоустойчивых и даже вечнозелёных растений (водяника, брусника, багульник) и активной вегетацией уже в июне — июле. Статистический анализ проводился с использованием данных метеостанций, для построения иллюстративных карт исходные данные интерполировались в узлы регулярной сетки $1 \times 1^{\circ}$ методом кригинга (Байков и др., 2012; Берг, Лёфстрём, 1980).

Зональная изменчивость метеорологических характеристик и значений NDVI

Как видно из *табл. 1* и *рис. 1* (см. с. 168), осреднённые по зонам среднемноголетние значения приземной температура воздуха увеличиваются с юга на север — от 4,8 °С в тундре до 17 °С в степи, равно как и стандартное отклонение — от 1,01 до 1,25 °С. Незначимые многолетние тенденции приземной температуры воздуха отмечаются в центре Восточно-Европейской равнины при заметных многолетних трендах на севере и юге — 0,48 °С/10 лет и 0,92–0,87 °С/10 лет. Осадки максимальны в центре и особенно — в восточной части Восточно-Европейской равнины, в зонах смешанных и широколиственных лесов — 232 и 236 мм при максимальных здесь значениях стандартного отклонения. Однако многолетние тенденции изменений в центре региона малозаметны при существенном их снижении на юго-востоке региона: –2,150 мм/10 лет и 1,407 мм/10 лет в лесостепи и степи (см. *табл. 1*, *рис. 1*), процесс аридизации здесь отмечают, например, А. Н. Золотокрылин и Т. Б. Титкова (2011). Соответственно низким значениям приземной температуры воздуха и достаточному количеству осадков зимнего периода (Китаев, Титкова, 2020) максимальные значения зимнего снегозапаса велики в центре и на северо-востоке Восточно-Европейской равнины, в тундре и лесотундре, в тайге, в восточной части зоны смешанных лесов: 86–111 мм при максимальных здесь значениях стандартного отклонения 27,3–30,5 мм.

Таблица 1. Региональные особенности приземной температуры воздуха, осадков, снежного покрова и значения NDVI (2000–2019)

Характеристика	Природная зона	Среднее многолетнее	Стандартное отклонение	Коэффициент линейного тренда за 10 лет
Приземная температура воздуха, среднее за апрель – июль, °С	Тундра и лесотундра	4,8	1,08	0,48
	Тайга	10,7	1,01	–0,06
	Смешанные леса	12,1	1,02	0,34
	Широколиственные леса	14,3	1,08	0,42
	Лесостепь	15,8	1,11	0,92
	Степь	17,0	1,25	0,87
Осадки, сумма за апрель – июль, мм	Тундра и лесотундра	142	36,56	8,86
	Тайга	217	55,61	5,54
	Смешанные леса	232	63,74	–4,73
	Широколиственные леса	236	66,59	–4,35
	Лесостепь	227	57,23	–1,50
	Степь	153	55,25	–4,07
Максимальные запасы воды в снежном покрове, мм	Тундра и лесотундра	111	30,51	5,95
	Тайга	89	27,47	–1,31
	Смешанные леса	86	27,32	–0,63
	Широколиственные леса	87	26,01	–0,19
	Лесостепь	76	25,32	0,33
	Степь	55	23,93	1,99
Значения NDVI, июль	Тундра и лесотундра	0,704	0,022	0,012
	Тайга	0,786	0,028	0,029
	Смешанные леса	0,754	0,037	0,002
	Широколиственные леса	0,778	0,037	0,012
	Лесостепь	0,703	0,059	–0,029
	Степь	0,561	0,074	–0,053

Примечание: курсивом выделены незначимые на уровне 95 % коэффициенты регрессии.

Рис. 1. Пространственное распределение среднееголетних июльских значений NDVI, средних и суммарных за апрель – июль значений приземной температуры воздуха и осадков, максимального снегозапаса (А1, Б1, В1, Г1); коэффициенты линейных трендов характеристик (А2, Б2, В2, Г2)

Значимое многолетнее снижение снегозапаса отмечается на юге региона, в степи и лесостепи — на фоне заметного повышения приземной температуры воздуха; на остальной территории значимого изменения снегозапаса не наблюдается (см. *табл. 1, рис. 1*).

Наибольшее количество фитомассы растительного покрова июля отмечается в зоне лесов центра Восточно-Европейской равнины — соответственно июльским значениям NDVI в диапазоне 0,754–0,786 (см. *табл. 1*). При этом для данной территории характерны средняя для апреля–июля приземная температура воздуха, большие суммарные осадки и снегозапас (200–250, 120–160 мм). Область с положительными значимыми тенденциями многолетних изменений значений NDVI также расположена в центре региона, значимые отрицательные тенденции — на юго-востоке в лесостепях и степях (см. *рис. 1*), где происходит заметное многолетнее повышение приземной температуры воздуха, снижение суммарных осадков и максимального снегозапаса, способствующих опустыниванию (Золотокрылин, Титкова, 2011; Сапанов, 2018).

Отклик многолетних изменений значений NDVI на изменчивость метеорологических характеристик

В целом теснота корреляционных связей месячных значений NDVI с метеорологическими характеристиками невелика, за исключением связей майских и июньских значений NDVI с приземной температурой воздуха в степной зоне (коэффициенты корреляции 0,56 и 0,53). Для интегральной оценки связи исследуемых характеристик использованы среднеемноголетние июльские значения NDVI, средние и суммарные значения приземной температуры воздуха и осадков за апрель–июль, а также величина максимального снегозапаса. На *рис. 2* (см. с. 170) в точечном виде представлено распределение соотношений ежегодных значений NDVI со значениями приземной температуры воздуха и суммарных осадков, с максимальным снегозапасом; *табл. 2* содержит параметры уравнений парной регрессии. В данном случае теснота связей изменчивости характеристик при слабых регрессионных зависимостях уточняется углом наклона трендов и коэффициентами уравнений парной регрессии для совокупностей соответствующих характеристик. Так, заметное увеличение значений NDVI на фоне роста приземной температуры воздуха в тундре сменяется их снижением на юге (коэффициенты уравнений регрессии 38,09 и –16,71...–42,25). Существенный рост значений NDVI при увеличении суммарных осадков и снегозапаса происходит в лесной зоне и степях, заметное снижение — в тундре (см. *табл. 2, рис. 2*).

Таблица 2. Корреляционная связь многолетнего хода значений NDVI (июль) с ходом максимального снегозапаса (SWE), приземной температуры воздуха (t) и осадков (pr) (среднее и сумма за апрель–июль)

Природная зона	Параметры уравнений корреляции		
	NDVI – температура T , °C	NDVI – осадки, мм	NDVI – снегозапас, мм
Тундра и лесотундра	$38,09t - 22,198$	$-279,31pr + 340,03$	$-98,34SWE + 180,55$
Тайга	$-42,25t + 43,93$	$734,08pr - 359,82$	$-15,17SWE + 77,30$
Смешанные леса	$-37,82t + 42,92$	$1105,70pr - 602,08$	$7,05SWE + 81,17$
Широколиственные леса	$-32,30t + 39,44$	$1405,50pr - 858,29$	$11,64SWE + 78,19$
Лесостепь	$-23,89t + 32,64$	$1196,30pr - 613,94$	$23,27SWE + 60,11$
Степь	$-16,71t + 26,36$	$570,71pr - 167,46$	$26,67SWE + 41,79$

Соответственно проведённой множественной регрессии, ведущим значимым климатическим фактором изменений NDVI становится приземная температура воздуха в виде прямой зависимости для тундры и лесотундры (бета-коэффициент 0,606) и обратной зависимости — для остальной территории при уменьшении бета-коэффициентов от –0,662 в зоне тайги до –0,488 в зоне степей (*табл. 3*).

Рис. 2. Соотношение среднемноголетних значений приземной температуры воздуха (T , °C), осадков (pr , мм) и максимального снегозапаса (SWE , мм) со значениями NDVI по метеостанциям тундры и лесотундры (1), тайги (2), смешанных лесов (3), широколиственных лесов (4), лесостепи и степи (5)

Таблица 3. Зональная регрессионная зависимость многолетнего хода значений NDVI (июль) от изменения максимального снегозапаса, приземной температуры воздуха и осадков (среднее и сумма за апрель – июль)

Природная зона	Параметры регрессионной зависимости			
	Общий коэффициент регрессии	Бета-коэффициенты		
		Снегозапас	Приземная температура воздуха	Осадки
Тундра и лесотундра	0,654	−0,185	0,606	0,140
Тайга	0,350	−0,043	−0,048	0,326
Смешанные леса	0,861	0,031	−0,662	0,326
Широколиственные леса	0,780	−0,039	−0,493	0,423
Лесостепь	0,841	0,095	−0,588	0,323
Степь	0,922	−0,410	−0,488	0,551

Примечание: курсивом выделены незначимые коэффициенты.

Вклад суммарных осадков повсеместно положителен при увеличении бета-коэффициентов к югу: от 0,140 в тундре до 0,551 в степи. Значимый вклад снегозапаса в изменения NDVI отмечается в тундре, лесостепях и в степях: бета-коэффициенты соответственно $-0,185$; $0,095$; $0,410$. Обратная зависимость хода характеристик в тундре может быть связана с медленным ростом приземной температуры воздуха при продолжительном снеготаянии, положительная связь в лесостепи и степи — с достаточным увлажнением территории.

Выводы

На основе анализа зональных различий NDVI как эквивалента изменчивости количества фитомассы исследован отклик растительности в период активной фазы вегетации на изменчивость предвесеннего и весеннего метеорологического режима территории Восточно-Европейской равнины. Оценены особенности пространственного распределения значений NDVI с учётом пространственной неоднородности метеорологических характеристик. Наибольшее количество фитомассы, согласно значениям NDVI, наблюдается в зоне лесов центра Восточно-Европейской равнины, где преобладают средние для неё значения приземной температуры воздуха, большие суммарные осадки и снегозапас. Область с положительными значимыми тенденциями значений NDVI расположена в северной части региона — при повышении здесь температуры воздуха и увеличении осадков; значимые отрицательные тенденции отмечаются на юго-востоке (лесостепи и степи) на фоне повышения температуры воздуха, снижения осадков и максимального снегозапаса. Полученный результат согласуется с выводами А. А. Тишкова с коллегами (2021) о причинах «позеленения» Арктики и А. Н. Золотокрылина и Т. Б. Титковой (2011) о процессе аридизации южных районов Восточно-Европейской равнины.

На основе анализа регрессионных уравнений получены зональные различия соотношений в многолетнем ходе значений NDVI с приземной температурой воздуха, суммарными осадками, максимальным снегозапасом. Увеличение значений NDVI при росте приземной температуры воздуха в тундре сменяется к югу их снижением, наиболее интенсивным в степях. Существенный рост значений NDVI при увеличении суммарных осадков и снегозапаса происходит в степях и широколиственных лесах, снижение — в тундре.

Повсеместно ведущим значимым климатическим фактором изменений продуктивности становится приземная температура воздуха в виде прямой зависимости для тундры и лесотундры и обратной — для остальной территории. Вклад изменчивости суммарных осадков повсеместно положителен при увеличении влияния с севера к югу. Значимый вклад снегозапаса в изменение NDVI отмечается лишь в тундре, лесостепях и в степях, коэффициенты $-0,185$; $0,095$; $0,410$ соответственно. Обратная зависимость хода характеристик в тундре может быть связана с продолжительным снеготаянием и медленным ростом приземной температуры воздуха, положительная связь в лесостепи и степи — с достаточным увлажнением территории.

Работа выполнена при поддержке темы № 0148-2019-0009 «Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России» Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук, а также Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-55-00007.

Литература

1. Байков В. А., Бакиров Н. К., Яковлев А. А. Математическая геология. Т. 1. Введение в геостатистику. Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2012. 228 с.
2. Берг Й., Лёфстрём И. Интерполяционные пространства. Введение: пер. с англ. / пер. В. С. Крюкова, П. И. Лизоркина. М.: Мир, 1980. 264 с.
3. Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б. Новый подход к мониторингу очагов опустынивания // Арид. экосистемы. 2011. Т. 17. № 3(48). С. 14–22.

4. Исаченко А. Г., Шляпников А. А. Ландшафты. М.: Мысль, 1989. 605 с.
5. Китаев Л. М., Титкова Т. Б. Зональные особенности изменений снегозапасов Восточно-Европейской равнины (по данным спутниковых наблюдений) // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 167–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-167-178.
6. Куст Г. С., Кудерина Т. М., Андреева О. В., Суслова С. Б., Лобковский В. А., Мандыч А. Ф., Бабина Ю. В., Тельнова Н. О., Птичников А. В., Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б., Черенкова Е. А., Кухта А. Е., Попова Е. Н., Семенов С. М., Костовская С. К., Нефедова Т. Г., Дроздов А. В., Волкова И. Н., Грачева Р. Г., Тишков А. А., Морозова О. В., Некрич А. С., Бардин М. Ю., Соболев Н. А., Суховеева О. Э. Деградация земель и опустынивание в России: новейшие подходы к анализу проблемы и поиску путей решения / отв. ред. Куст Г. С. М.: Изд-во «Перо», 2019. 235 с.
7. Сапанов М. К. Экологические последствия потепления климата в Северном Прикаспии // Арид. экосистемы. 2018. Т. 8. № 1. С. 13–21.
8. Титкова Т. Б., Виноградова В. В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86.
9. Тишков А. А., Белоновская Е. А., Кренке А. Н., Титова С. В., Царевская Н. Г. Изменения биологической продуктивности наземных экосистем Российской Арктики в XX в. // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 31–41.
10. Шукин И. С. Четырехязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии. М.: Совет. энцикл., 1980. 703 с.
11. Beck P. S., Atzberger C., Høgda K. A., Johansen B. Skidmore Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 100. P. 321–334.
12. Didan K., Munoz A., Solano R., Huete A. MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series). Version 3.00 / The University of Arizona. 2015. 35 p. URL: https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_June_2015_C6.pdf.
13. Sandler'skiy R., Puzachenko Y. G. Dynamic of landscape energetic characteristics based on remote sensing data // The Problems of Landscape Ecology. 2011. V. 333. P. 125–132.
14. Walker D. A., Epstein H. E., Raynolds M. K., Kuss P., Kopecky M. A., Frost G. V., Daniels F. J. A., Leibman M. O., Moskalenko N. G., Matyshak G. V., Khitun O. V., Khomutov A. V., Forbes B. C., Bhatt U. S., Kade A. N., Vonlanthen C. Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects // Environment Research Letter. 2012. V. 7. Art. No. 015504.

Zonal heterogeneity of vegetation response during active vegetative season to variability of spring meteorological regime over East European Plain

L. M. Kitaev, T. B. Titkova

*Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: lkitaev@mail.ru*

An assessment of the response of vegetation during the early growing season (April–June) to the variability of the pre-spring and spring meteorological regime was carried out. The analysis was realized using the MOD13A2 (v. 6) product, where NDVI values are contained as an equivalent to the amount of phytomass (MODIS/Terra data), as well as using the results of meteorological stations of Roshydromet observations. For the East European Plain, the period of active vegetation is considered (April–July) to take into account the vegetation activity of cold-resistant plant species and the possible effect of snow cover on the vegetation. The zonal regularities of spatial relationship of NDVI variability with air temperature, total precipitation and maximal snow storage have been obtained. The maximal NDVI values are typical of the center of the region (mixed and deciduous forests) with average air temperatures for the territory and significant total precipitation and maximal snow reserves. Based on the analysis of regression equations, zonal differences in the ratios of the long-term NDVI variation and each meteorological characteristic were estimated: a significant increase in NDVI with an increase in

surface air temperature occurs in the tundra, and with an increase in total precipitation and snow reserves in the forest-steppe and in the steppe. The greatest significance for the long-term NDVI variability during the active growing season everywhere have changes in the surface air temperature, then total precipitation, and snow reserves, but only for the tundra, forest-steppe and steppe.

Keywords: vegetation index NDVI, surface air temperature, total precipitation, active vegetation period, regression relationships, long-term trends, spatial variability, East European Plain

Accepted: 13.12.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-165-173

References

1. Baikov V.A., Bakirov N.K., Yakovlev A.A., *Matematicheskaya geologiya. T. 1. Vvedenie v geostatistiku* (Mathematical Geology. Vol. 1. Introduction to Geostatistics), Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2012, 228 p. (in Russian).
2. Bergh J., Löfström J., *Interpolation spaces: An Introduction*, Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1976, 217 p.
3. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., New approach to desertification seats monitoring, *Aridnye ekosistemy*, 2011, Vol. 17, No. 3(48), pp. 14–22 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-167-178.
4. Isachenko A.G., Shlyapnikov A.A., *Landshafty* (Landscapes), Moscow: Mysl', 1989, 605 p. (in Russian).
5. Kitaev L.M., Titkova T.B., Zonal features of changes in snow storages of East European Plain (according to satellite observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 167–178 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-167-178.
6. Kust G.S., Kuderina T.M., Andreeva O.V., Suslova S.B., Lobkovskii V.A., Mandych A.F., Babina Yu.V., Telnova N.O., Ptichnikov A.V., Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A., Kukhta A.E., Popova E.N., Semenov S.M., Kostovska S.K., Nefedova T.G., Drozdov A.V., Volkova I.N., Gracheva R.G., Tishkov A.A., Morozova O.V., Nekrich A.S., Bardin M.Yu., Sobolev N.A., Sukhoveeva O.E., *Degradatsiya zemel' i opustynivanie v Rossii: noveishie podkhody k analizu problemy i poisku putei resheniya* (Land degradation and desertification in Russia: modern approaches to the problem analysis and ways of solutions), Kust G.S. (ed.), Moscow: "Pero", 2019, 235 p. (in Russian).
7. Sapanov M.K., Environmental consequences of climate warming in the Northern Caspian region, *Aridnye ekosistemy*, 2018, Vol. 8, No. 1, pp. 13–21 (in Russian).
8. Titkova T.B., Vinogradova V.V., The response of vegetation to climate change in boreal and subarctic landscapes at the beginning of XXI century, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 75–86 (in Russian).
9. Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Krenke A.N., Titova S.V., Tsarevskaya N.G., Changes in the biological productivity of the Russian Arctic land ecosystems in the 21st century, *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2021, Vol. 11, No. 1, pp. 31–41 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41.
10. Shchukin I.S., *Chetyrekh'yazychnyi entsiklopedicheskii slovar' terminov po fizicheskoi geografii* (Four-language encyclopedic dictionary of terms in physical geography), Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1980, 703 p.
11. Beck P.S., Atzberger C., Høgda K.A., Johansen B., Skidmore Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 100, pp. 321–334, DOI: 10.1016/j.jag.2007.10.005.
12. Didan K., Munoz A., Solano R., Huete A., *MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series), Version 3.00*, The University of Arizona, 2015, 35 p., available at: https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_June_2015_C6.pdf.
13. Sandlerskiy R., Puzachenko Y.G., Dynamic of landscape energetic characteristics based on remote sensing data, *The Problems of Landscape Ecology*, 2011, Vol. 333, pp. 125–132.
14. Walker D.A., Epstein H.E., Reynolds M.K., Kuss P., Kopecky M.A., Frost G.V., Daniels F.J.A., Leibman M.O., Moskalenko N.G., Matyshak G.V., Khitun O.V., Khomutov A.V., Forbes B.C., Bhatt U.S., Kade A.N., Vonlanthen C., Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects, *Environment Research Letter*, 2012, Vol. 7, Art. No. 015504, DOI: 10.1111/avsc.12401.