

УДК630*561.24:528.854

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-355-367

Н.В. Рыгалова¹, Т.Г. Плуталова²

**ОЦЕНКА СВЯЗИ NDVI СТЕПНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ
И РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА СОСНЫ
ЛЕНТОЧНЫХ БОРОВ В ЗАСУШЛИВЫХ УСЛОВИЯХ
ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

АННОТАЦИЯ

В работе представлен пространственно-временной анализ рядов вегетационных индексов NDVI (по данным спутника MODIS) и дендрохронологических данных, полученных для степных районов Алтайского края. Серии NDVI рассчитаны по пяти полигонам естественных и природно-антропогенных степных ландшафтов за период 2000-2018 гг.

Экспериментальные участки естественных ландшафтов расположены на прибрежных и особо охраняемых природных территориях, природно-антропогенных – пашнях. Большинство точек расположено с сухостепных подпровинциях степной зональной области, меньшая часть – засушливостепной (в том числе дендрохронологический участок).

Хронология ширины годичных колец построена для сосны обыкновенной степной части экстразональных ленточных боров. Для рядов NDVI практически всех полигонов за исследуемый период выявлен положительный тренд изменения вегетационных индексов, слабый положительный тренд зафиксирован и для древесно-кольцевой хронологии сосны. Более выраженный положительный тренд характерен для участка с наиболее низкими средними значениями NDVI, отрицательный тренд – для участка с наиболее высокими средними значениями вегетационного индекса.

Корреляция осредненных по полигонам рядов NDVI друг с другом составила от 0,54 до 0,64 (значимы при $p < 0,05$). Выявлена зависимость анализируемых рядов от динамики увлажнения территории. Коэффициенты корреляции гидротермического коэффициента Селянинова с рядами NDVI составили от 0,51 до 0,76, а с древесно-кольцевой хронологией 0,63 (значимы при $p < 0,05$). Установлены единичные статистически значимые связи между хронологией сосны и рядами NDVI, относящимися в основном к растительным сообществам сухой степи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: NDVI, гидротермический коэффициент, древесно-кольцевая хронология, сухая степь, ленточные боры.

¹ Алтайский государственный университет, Институт географии, проспект Ленина, 61, 656049 Барнаул, Россия, *e-mail:* natalia.ml@mail.ru

² Институт водных и экологических проблем СО РАН, ул. Молодежная, 1, 656038, Барнаул, Россия, *e-mail:* plutalova.tg@gmail.com

Natalia V. Rygalova¹, Tatiana G. Plutalova²

ESTIMATION OF THE RELATION OF NDVI STEPPE VEGETATION AND RADIAL GROWTH OF PINE BELT FORESTS IN ARID CONDITIONS OF THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

ABSTRACT

This article presents a spatial-temporal analysis of the NDVI vegetation series (based on the MODIS satellite data) and dendrochronological data obtained for the steppe regions of the Altai Territory. NDVI series are built for five polygons of natural and natural-anthropogenic steppe landscapes for the period 2000-2018. Experimental areas of natural landscapes are located in coastal and specially protected natural areas, natural and anthropogenic arable lands. Most of the points are located in the dry-steppe sub-provinces of the steppe zonal area, a smaller part is in the arid-steppe (including the dendrochronological area). The chronology of the tree ring width is built for the Scots pine in the steppe part of extrazonal belt pine forests. A positive trend in vegetation indices change and a weak positive trend for the tree-ring chronology of the pine were found for the NDVI series of almost all polygons for the study period. A more pronounced positive trend is characteristic of the area with the lowest average NDVI values, while a negative trend is characteristic of the area with the highest average values of the vegetation index. The correlation of the NDVI series averaged over polygons with each other ranged from 0.54 to 0.64 (significant at $p < 0.05$). The dependence of the analyzed series on the dynamics of moistening of the territory was revealed. The correlation coefficients of the Selyaninov hydrothermal coefficient with the NDVI series ranged from 0.51 to 0.76, and with the tree-ring chronology was 0.63 (significant at $p < 0.05$). A statistically significant relationship was established for some points between the chronology of the pine and the NDVI series, mostly related to dry steppe vegetation.

KEYWORDS: NDVI, hydrothermal coefficient, tree-ring chronology, dry steppe, pine belt forests.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение ширины годовых колец деревьев позволяет оценить изменчивость их стволовой продуктивности в условиях изменяющегося климата достаточно точно и локально. Однако для древостоев, произрастающих в переходных биомах или на границах своих зональных ареалов, характерна региональная согласованность радиального прироста, обусловленная влиянием лимитирующих климатических факторов среды. Для получения пространственно-временной информации о динамике продуктивности степной растительности возможно использовать данные дистанционного зондирования, которые обеспечивают более масштабный охват анализируемых ландшафтов (прежде всего из-за пространственного разрешения имеющихся в наличии космических снимков). В качестве показателя продуктивности растительности могут быть использованы значения NDVI [Золотокрылин и др., 2013]. Поиск связи между показателями продуктивности степной растительности и древесных сообществ, полученных разными методами, представляет научный интерес.

¹ AltayStateUniversity, Institute of Geography, Lenin Avenue, 61, 656049 Barnaul, Russia, e-mail: natalia.ml@mail.ru

² Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Molodezhnaya str., 1, 656038, Barnaul, Russia, e-mail: plutalova.tg@gmail.com

Пространственное сочетание древесных сообществ и сухостепной растительности отмечено на юге Западной Сибири (юго-запад Алтайского края), это обстоятельство определило территорию данного исследования. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) представлена здесь в ленточных борах, которые как экстразональные образования отклоняются на юг от основного ареала произрастания данного вида [Вангниц, 1953; Правдин, 1964] по долинам древнего стока.

Использование вегетационного индекса растительности NDVI и древесно-кольцевых хронологий деревьев в сопряженном анализе изменчивости продуктивности растительных сообществ проводилось ранее [Coulthard et al., 2017; Liu et al., 2021; Malmström et al., 1997; Vicente-Serrano et al., 2016; Wang et al., 2004], в рамках которых исследовалась связь радиального прироста деревьев и NDVI лесных сообществ или климатически опосредованная связь древесно-кольцевых хронологий и NDVI степной растительности.

Исследование изменения вегетационных индексов степных сообществ и радиального прироста деревьев в засушливой зоне позволит оценить реакцию растительности на потепление климата, фиксируемое в мире и России¹, и усиливающуюся аридизацию данных территорий. Несмотря на поступательное увеличение среднесезонной температуры³, отмечаются разнонаправленные флуктуации временной динамики NDVI [Тельнова, 2017], обусловленные в том числе изменчивостью осадков. В условиях степи, в наибольшей степени сухой степи, пространственно-временные колебания величины атмосферных осадков могут достигать больших значений по территории.

Установление связи между древесно-кольцевыми хронологиями (ДКХ) деревьев и вегетационными индексами степной растительности проводится с целью выявления общих тенденций в динамике погодичной продуктивности разных растительных сообществ в условиях дефицита влаги. В случае, если связь будет достоверно установлена, то будет возможна реконструкции продуктивности степных сообществ в прошлое [Wang et al., 2010].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой исследований продуктивности степных сообществ являются методы, основанные на расчете и оценке вегетационных индексов, представляющих собой комбинации спектральных каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. В данной работе для анализа используется наиболее распространенный вегетационный индекс NDVI [Rouse et al., 1973]:

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

NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра,

RED – отражение в красной области спектра.

NDVI рассчитывался на основе продукта MOD13Q1 (2000) (16-дневный композит с пространственным разрешением 250 м), полученного с помощью спектрометра TERRA/MODIS за первую половину июня 2000-2018 гг.²³. Эти даты соответствуют повышенной вегетационной активностью на степных территориях, так как в середине июня

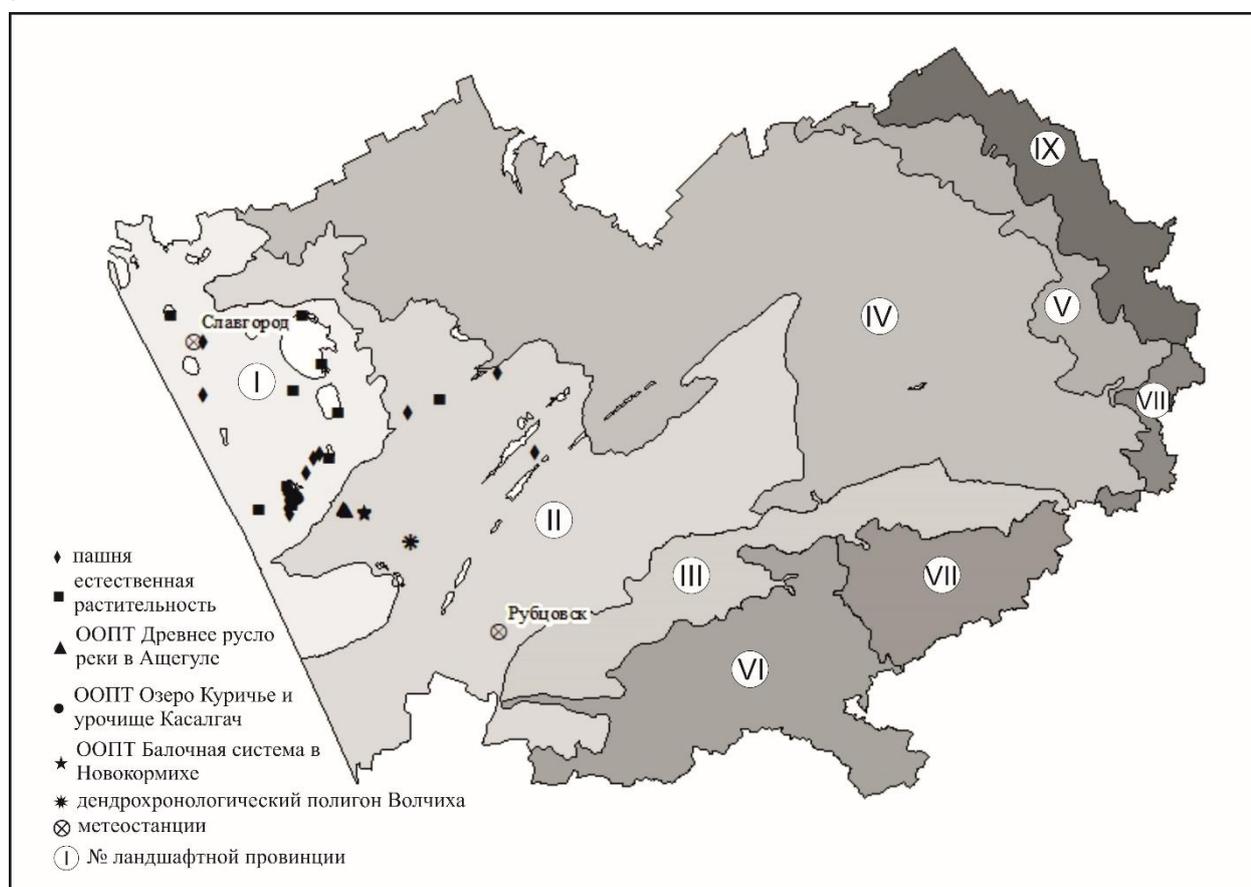
¹ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М., 2020. 97 с. Электронный ресурс: <http://www.meteorf.ru/press/news/20626/> (дата обращения: 30.02.2021).

² MODIS Vegetation Index Products (NDVI and EVI). Электронный ресурс: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php> (дата обращения: 10.01.2021).

³ USGS Global Visualization Viewer. Электронный ресурс: <http://glovis.usgs.gov/> (дата обращения: 15.01.2021).

разнотравье начинает сменяться ксерофитными дерновинными злаками [Мордкович, 2014; Сайб и др., 2020]. Обработка данных проводилась с помощью QGIS 3.16.3.

В степной зональной области были выбраны 5 тестовых полигонов по 10 точек в каждом: один в границах пахотных угодий, один – в береговой зоне степных озер (в данном случае при выборе точек использован типологический подход, точки расположены на значительном расстоянии друг от друга), три полигона – на территориях ООПТ (использован индивидуальный подход, точки в каждом полигоне расположены концентрировано в связи с небольшим размером ООПТ) (рис. 1). Выбор полигонов осуществлялся по принципу выделения антропогенно нарушенных ландшафтов (пашни), ненарушенных (береговые территории и малопригодные для распашки в связи с заболоченностью и засоленностью) и особо охраняемые природные территории, которые в настоящее время представляют собой ареалы сохранения естественной степной растительности.



*Рис. 1. Территория исследования в границах Алтайского края (ландшафтная основа¹)
Ландшафтные провинции:*

I. Кулундинская, II. Южно-Приалейская, III. Предалтайская, IV Верхне-Обская, V. Предсалаирская, VI. Северо-Западная Алтайская, VII. Северо-Алтайская, VIII. Северо-Восточная Алтайская, IX. Салаирская.

*Fig. 1. Geographical location of research area in the Altai Krai (landscapes)
Landscapes: I. Kuluna, II. South-Pri-Aleysk, III. Pre-Altai, IV. Upper Ob, V. Pre-Salair, VI. North-West Altai, VII. North Altai, VIII. North-Eastern Altai, IX. Salair*

¹ Ландшафтная карта Алтайского края. Масштаб 1:500000. Науч. рук. Ю.И. Винокуров. ИВЭП СО РАН, 2016.

Для отображения разнообразных условий ведения сельского хозяйства пахотные угодья были выбраны в трех подпровинциях: сухо-, засушливо- и умеренно засушливо-степных, отличающихся по количеству осадков, температурному режиму, почвенным характеристикам (рис. 2). Высота по отдельным точкам колеблется от 125 м (озерно-аллювиальные плоские равнины) до 268 м (плоские и слабоволнистые водораздельные поверхности плато). Основными возделываемыми культурами являются пшеница яровая, овес и подсолнечник.

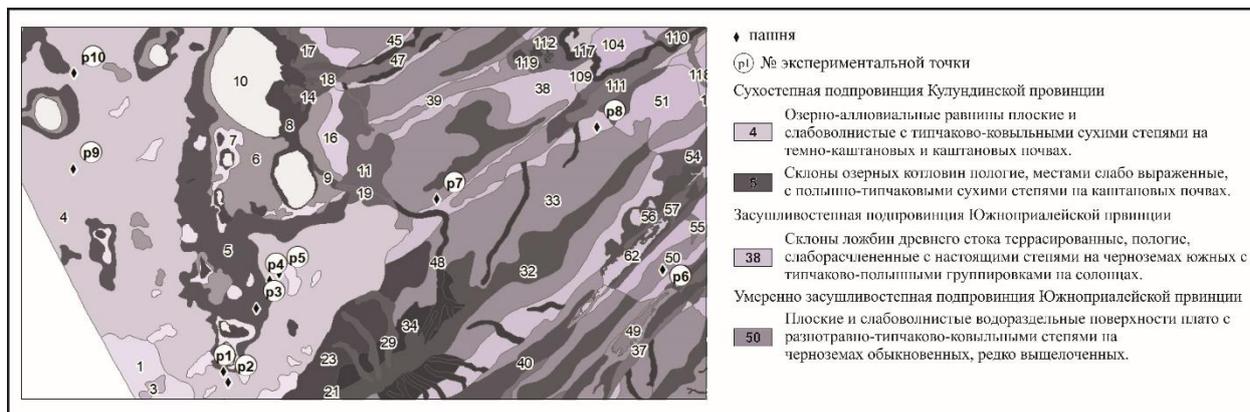


Рис. 2. Местоположение экспериментальных точек категории папня¹
 Fig. 2. Geographical location of experimental points of the arable land category

Береговые участки расположены на берегах озер Кулундинское, Кучукское, Большое Яровое, Петухово, Скрипун (рис. 3). Высота по отдельным точкам колеблется от 100 до 176 м. Большая часть точек (9 из 10) расположена в границах сухостепной подпровинции Кулундинской провинции и представлена низкими озерными террасами плоскими и плоско-западными с солонцово-солончаковыми лугами в комплексе со злаково-разнотравными болотно-солончаковыми лугами.

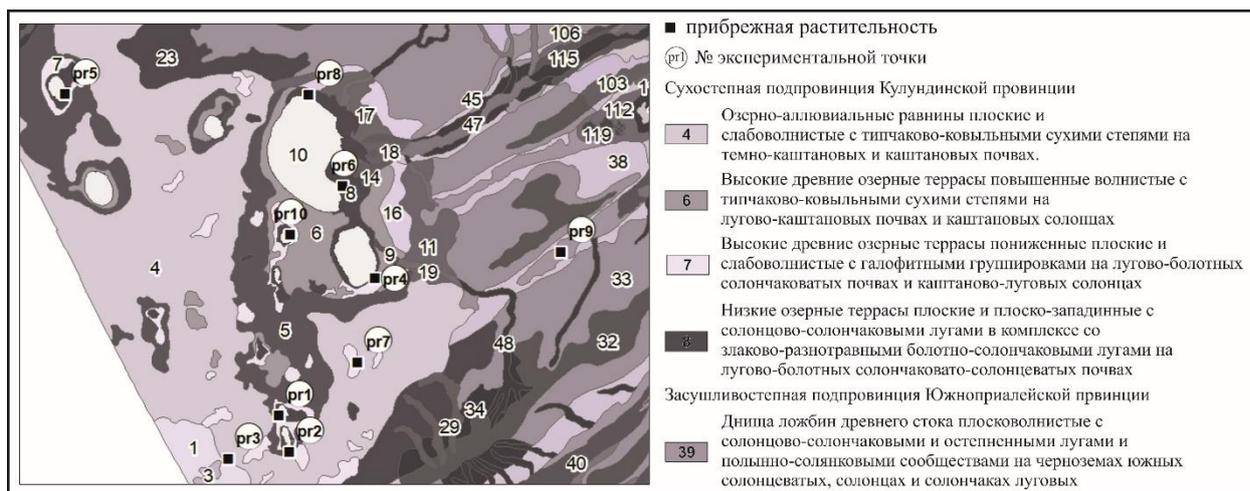


Рис. 3. Местоположение экспериментальных точек категории прибрежная растительность
 Fig. 3. Geographical location of experimental points of the coastal vegetation category

¹ Здесь и далее приведены ландшафтные местности, в границах которых расположены точки. Ландшафтная карта Алтайского края. Масштаб 1:500000. Науч. рук. Ю.И. Винокуров. ИВЭП СО РАН, 2016.

Памятник природы краевого значения «Древнее русло реки в Ащегуле» образован 6 мая 2014 г. в Михайловском районе Алтайского края (рис. 4). Представляет собой фрагмент эрозионно-балочного рельефа: заросшее растительностью русло пересохшего водотока, которое пересекает плоскую поверхность с небольшими уклонами (менее $0,5^\circ$) и высотой от 142 до 201 м. Расположен в нижней части северо-западного значительно выположенного склона юго-западного окончания Кулундинско-Касмалинского увала Приобского плато, постепенно переходящего в Кулундинскую равнину. Значительные площади занимают фрагменты разнотравно-ковыльно-типчаковых степей с доминированием ковыля-волосатика (*Stipa capillata*), овсяницы валисской (*Festuca valesiaca*).

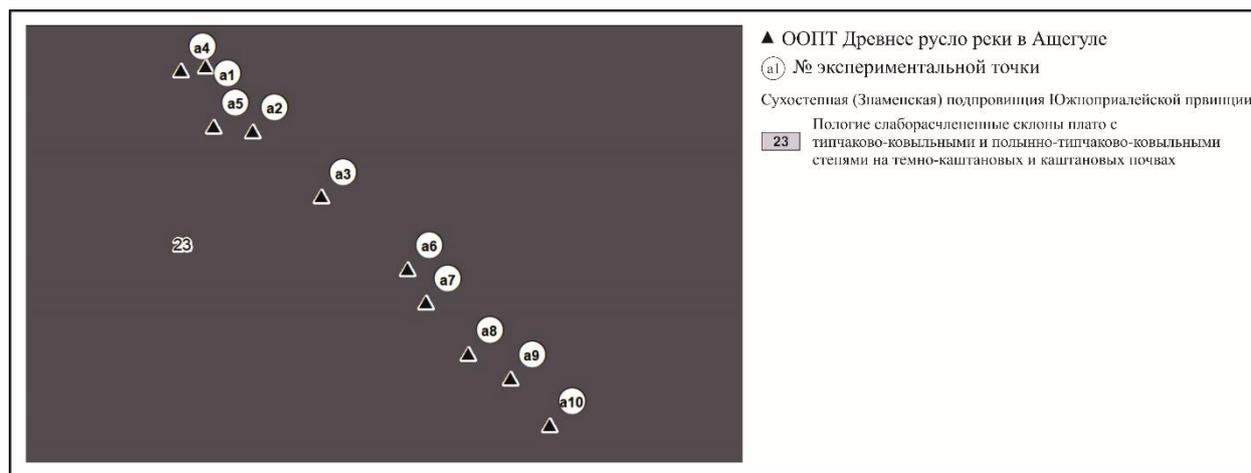


Рис. 4. Местоположение экспериментальных точек категории ООПТ «Древнее русло реки в Ащегуле»

Fig. 4. Geographical location of experimental points of the protected areas category in the «Ancient river bed in Ashchegul» territory

Памятник природы краевого значения «Озеро Куричье и урочище Касалгач» образован 13 апреля 1998 г. в Ключевском районе Алтайского края (рис. 5). Высоты изменяются незначительно – 128-131 м. Граница урочища Касалгач совпадают с естественными границами березового заболоченного леса имеют ивовый подлесок до 2 м. В травяном покрове доминирует осока дернистая (*Carex caespitosa*). На восточном берегу озера – песчаные дюны, переходящие в кочкарник, к юго-востоку – тростник (*Phragmites communis*).

Памятник природы краевого значения «Балочная система в Новокормихе» образован 6 мая 2014 г (рис. 6). Представляет собой фрагмент эрозионно-балочного рельефа с перепадом высот от 276 м до 285 м. Расположен в верхней части северо-западного склона юго-западного окончания Кулундинско-Касмалинского увала Приобского плато на стыке с Кулундинской равниной. Степные участки представлены полынно-тырсоковыльными и тырсоковыльными настоящими сухими степями с доминированием плотно дерновинного злака ковыля-волосатика (*Stipa capillata*). Древесная растительность занимает дно балки и её северные склоны, где формируется березово-осиновый крупнотравный орляковый лес с подлеском. В понижении, на более увлажненных участках расположены лугово-болотные комплексы.

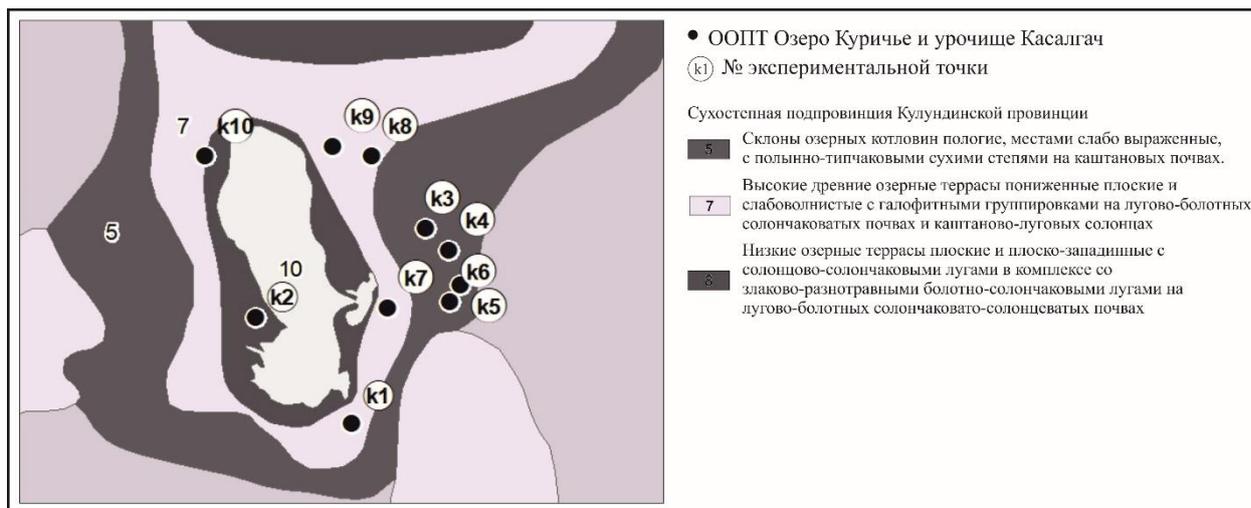


Рис. 5. Местоположение экспериментальных точек категории ООПТ «Озеро Куричье и урочище Касалгач»

Fig. 5. Geographical location of experimental points of the protected areas category in the «Kurichye lake and Kasalgach urochishche» territory

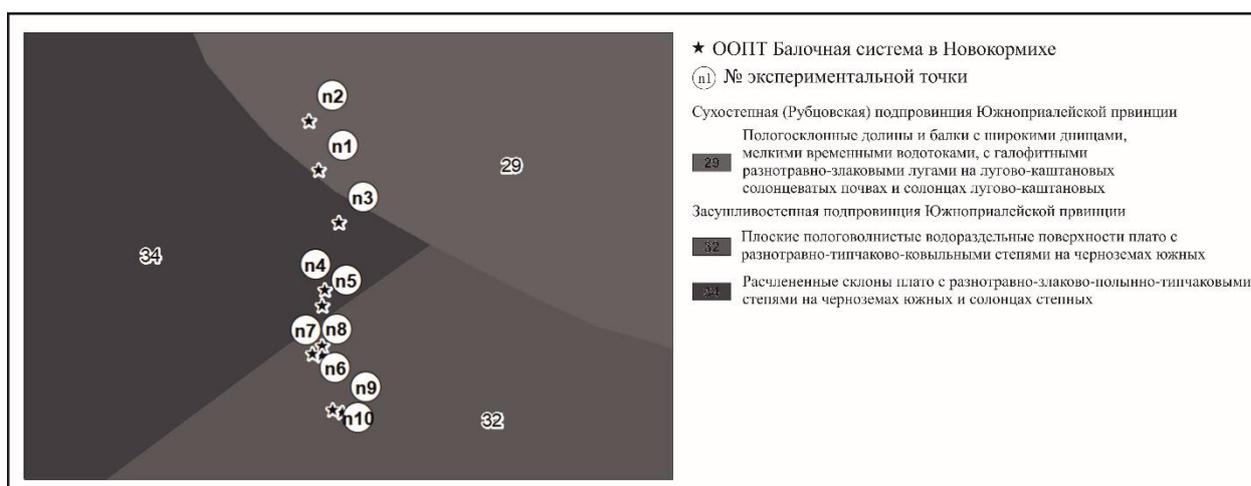


Рис. 6. Местоположение экспериментальных точек категории ООПТ «Балочная система в Новокормихе»

Fig. 6. Geographical location of experimental points of the protected areas category in the «Balka system in Novokormikha» territory

В качестве дендрохронологического материала использована обобщенная древесно-кольцевая хронология (ДКХ) Волчиха продолжительностью 251 год (1768–2018 гг.), построенная по сосне ленточных боров в Волчихинском районе Алтайского края. Модельный участок расположен на высоте примерно 220 м (днище долины древнего стока) и принадлежит засушливостепной подпровинции Южноприамурской провинции Кулундинской степной зональной области. Образцы были собраны с 18 деревьев (по 2 радиуса с дерева) по стандартной методике [Шиятов и др., 2000], измерение проводилось на установке LINTAB в программе TSAP [Rinn, 1996], обработка данных проводилась в

программном пакете DPL. В качестве аппроксимирующих кривых выбраны негативные экспоненты (и для отдельных индивидуальных хронологий применен кубический сплайн 2/3), в работе использована остаточная (выбеленная – с удаленным автокорреляционным шумом) обобщенная хронология. Коэффициент чувствительности ДКХ за анализируемый период (2000–2018 гг.) составил 0,32, что превышает пороговый уровень [Ferguson, 1969] и подтверждает возможность использования ряда в дендроклиматическом анализе.

В качестве метеорологических данных в работе были использованы месячные значения температуры воздуха и атмосферных осадков ГМС Славгород и Рубцовск (2000–2018 гг.), которые находятся в открытом доступе¹ [12] и рассчитанные на их основе значения гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова. Обе метеостанции расположены в степной зональной области, Славгород – в сухостепной подпровинции Курлундинской провинции, Рубцовск – засушливостепной подпровинции Южноприамурской провинции.

В работе использованы метод дистанционного зондирования Земли (получение значений вегетационного индекса NDVI), дендрохронологический (включающий от сбора первичных данных до получения ДКХ), статистический метод (расчет коэффициентов корреляции в программе Statistica 13.3) и картографический (использование в анализе ландшафтной карты территории исследования и создание картографического иллюстрирующего материала)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Линейные тренды изменений осредненных по 10 точкам значений NDVI для всех полигонов (исключение ООПТ Новокормиха) за период 2000-2018 гг. положительные (рис. 7). На данном временном отрезке ДКХ Волчиха также демонстрирует слабый положительный тренд. Полигон ООПТ Новокормиха единственный из всех модельных участков, которые находится полностью в засушливостепной подпровинции Южноприамурской провинции, остальные (полигоны Береговой и Пашня по большинству точек) приурочены к сухостепной подпровинции. Динамика значений гидротермического коэффициента Селянинова, рассчитанных по данным метеостанции Славгород, за период 2000–2018 гг. имеет отрицательный тренд (хотя если рассматривать динамику значения с 2003 года, то тренд меняет вектор на положительный), а значений ГТК, рассчитанных для ГМС Рубцовск, характерна положительная тенденция изменения.

Стоит также отметить, что наиболее выраженный положительный тренд вегетационного индекса у ряда ООПТ Ащегуль, который характеризуется наименьшими средними арифметическими значениями (табл.), что свидетельствует о более угнетенном состоянии растительности по сравнению с другими участками. Одновременно для ряда Новокормиха (продемонстрировавшего отрицательный тренд) отмечены наибольшие значения среднего. Можно заключить, что на рост увлажнения территории более интенсивно реагируют растительные сообщества, характеризующиеся недостаточным уровнем образования фитомассы (в сухостепных условиях, вероятно, в результате недостатка влаги). Положительный тренд также может объясняться увеличением закустаренности участков, что также получает большее развитие в приросте количества осадков.

¹ Специализированные массивы. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). Электронный ресурс: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 10.01.2021).

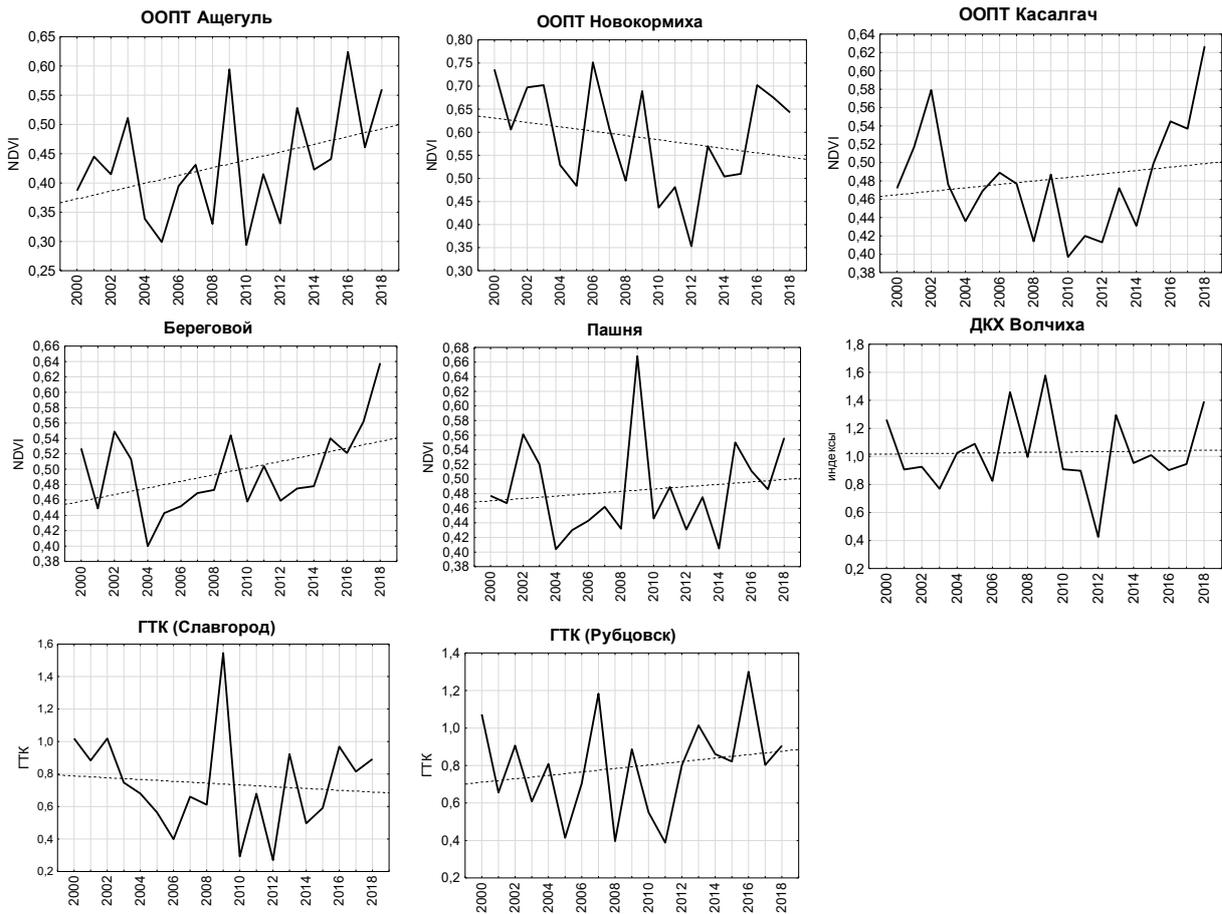


Рис. 7. Осредненные (по 10 точкам) значения NDVI степной растительности, ДКХ Волчиха и ГТК Селянинова (по ГМС Славгород и Рубцовск) за период 2000-2018 гг.

Fig. 7. Averaged (over 10 points) NDVI values of steppe vegetation, Volchikha tree-ring chronology, and Selyaninov hydrothermal coefficient (Slavgorod and Rubtsovsk weather stations) for the period 2000-2018.

Корреляционный анализ рядов продуктивности растительности (осредненных по 10 точкам серий NDVI каждого полигона и ДКХ Волчиха) показал статистически значимую положительную связь с ГТК (данные ГМС Славгород): для Берегового и ООПТ Касалгач составил 0,51, для ООПТ Новокормиха и ДКХ Волчиха – 0,63, для полигонов Пашня и Ащегуль – выше 0,7. Следовательно, справедливо говорить о наличии общего лимитирующего климатического фактора формирования биомассы травянистой растительности и радиального роста деревьев в условиях сухой степи. О пространственной специфике изменения увлажнения по территории говорит тот факт, что серии NDVI также, как и ДКХ, не показали значимой связи с рядом ГТК метеостанции Рубцовск, находящейся в засушливой степной подпровинции.

На основании того, что динамика продуктивность деревьев и степных сообществ зависит от колебаний увлажнения территории была проанализирована климато-обусловленная связь между ними: рассчитаны коэффициенты корреляции хронологии сосны и серий NDVI по 5 полигонам (использовались как осредненные ряды по 10 точкам, так и по всем точкам отдельно).

Табл. Характеристика рядов NDVI и корреляции с ДКХ сосны
 Table. Characteristics of NDVI series and correlations with tree-ring chronology pine

Полигоны NDVI	осредненные по 10 точкам полигона				Статистически значимые связи ДКХ Волчиха с рядами NDVI по отдельным точкам полигонов
	Среднее значение	Станд. откл.	Осредн. r^* с рядами NDVI других полигонов	r^* с ДКХ	
Береговой	0,50	0,06	0,63	0,33	т. 2 (0,46)
Пашня	0,48	0,07	0,62	0,45	т. 2 (0,63); т. 3 (0,48); т. 10 (0,45)
ООПТ Ащегуль	0,43	0,10	0,63	0,40	т. 3 (0,54); т. 5 (0,46)
ООПТ Новокормиха	0,59	0,11	0,54	0,35	т. 1 (0,55); т. 4 (0,46)
ООПТ Касалгач	0,48	0,06	0,64	0,30	т. 1 (0,74)

r^* – коэффициенты корреляции (жирным выделены статистически значимые при $p < 0.05$).

В результате единственная значимая связь с осредненными значениями по полигонам была получена только по пахотным угодьям (табл.). В границах выделенных полигонов от 1 до 3 точек показали значимую корреляцию NDVI с ДКХ Волчиха, при этом коэффициенты скорее свидетельствовали об умеренной связи (до $|0,5|$), реже о значительной ($|0,5| - |0,7|$).

Большинство точек, показавших максимальную корреляционную связь, относятся к Кулундинскому ландшафтному району сухостепной подпровинции Кулундинской провинции (5 из 9) и Бель-Агачскому району сухостепной (Рубцовой) подпровинции Южноприамурской провинции (2 из 9).

Низкие значения корреляции древесно-кольцевых хронологий возможно могут быть связаны с неоднородностью продуцирования степной растительности на локальном уровне. В условиях дефицита влаги микрорельеф перераспределяет ее и определяет интенсивность формирования зеленой массы растениями. На это может указывать средние коэффициенты корреляции рядов NDVI друг с другом (при $r \approx 0,6$, доля объясненной дисперсии составляет около 40 %), несмотря на то, что большинство из них представлено сходными растительными сообществами (за исключением пахотных угодий). При такой мозаичности микроландшафтных условий возможно необходимо увеличить разрешение используемых космических снимков за счет привлечения данных других спутников. Сложности в оценке продуктивности из-за низкого разрешения снимков MODIS отмечалось ранее [Золотокрылин и др., 2013].

Также важным моментом является сезон получения анализируемых данных дистанционного зондирования. Если для зональной сухостепной растительности май-июнь является периодом максимальных объемов продуцирования фитомассы, а в июле-августе отмечается усыхание растений целинной степи [Немцева и др., 2018], то в июне годовое кольцо деревьев еще формируется. Пик радиального прироста сосны в лесостепной зоне Сибири приходится на конец мая [Arzac et al., 2018], таким образом в июне формируется ранняя древесина, которая занимает значительную часть годового кольца и определяет его ширину, но тем не менее формирование кольца продолжается на протяжении июля-августа [там же].

ВЫВОДЫ

Выполненное исследование позволило определить тенденции изменения вегетационных индексов для различных растительных сообществ природно-антропогенных и естественных ландшафтов в степной зоне юга Западной Сибири за последние два десятилетия. Динамика гидротермического коэффициента, определяющего увлажнение территории, в XXI в. показала по данным метеостанций Рубцовск и Славгород (по последней ГМС только с 2003 года) положительный тренд, который был зафиксирован и в рядах NDVI всех сухостепных (или преимущественно, сухостепных по большинству точек) полигонов. Динамика NDVI для участка, расположенного в условиях засушливой степи, продемонстрировала отрицательный тренд. Для остаточной древесно-кольцевой хронологии сосны ленточных боров также отмечен слабый положительный тренд.

Наличие общего лимитирующего фактора (увлажнения территории), определяющего динамику вегетационного индекса и радиального прироста деревьев в степной зоне, позволил провести их корреляционный анализ. Была выявлена умеренная связь ДКХ и рядов NDVI от 1 до 3 точек по каждому полигону (r от 0,45 до 0,74 при $p < 0,05$). Наибольший отклик был получен по точкам, приуроченных в основном к сухостепным подпровинциям степной зональной области.

Причиной того, что были обнаружены лишь единичные случаи связи ДКХ и NDVI, может быть низкое разрешение снимков спектрорадиометра MODIS (250×250 м), которые не могут дать детальную информацию по продуктивности степных и сухостепных растительных сообществ. Образование фитомассы в сухостепных местообитаниях зависит от доступности влаги, перераспределяемой микрорельефом территории. При этом необходимы дополнительные исследования для понимания характера связи между этими двумя показателями. Перспективным направлением является рассмотрение значений NDVI за разные месяцы для сезонной оценки изменчивости вегетационного индекса степной растительности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской программы ИВЭП СО РАН (проект № 0306-2021-0007).

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out within the framework of the Research Program of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (Project 0306-2021-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вангниц П.Р. Ленточные боры. М.: Гослесбумиздат, 1953. 153 с.
2. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Уланова С.С., Федорова Н.Л. Наземные и спутниковые исследования продуктивности пастбищ республики Калмыкии с различной степенью деградации растительных сообществ. Аридные системы. 2013. Т. 19. №4(57). С. 31–39.
3. Мордкович В.Г. Степные экосистемы. Новосибирск. 2014. 170 с.
4. Немцева Л.Д., Беспалова Л.А., Голубева Е.И., Михайлов С.И. Оценка состояния растительного покрова сухостепных ландшафтов в условиях выпаса с применением методов дистанционного зондирования Земли. Труды ЮНЦ РАН. 2018. Т. VII. С. 151–164. DOI: 10.23885/1993-6621-2018-7-151-164.
5. Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 191 с.
6. Сайб Е. А., Безбородова А. Н., Соловьев С. В., Миллер Г. Ф., Филимонова Д. А. Выявление разновозрастных залежей на эрозионно-опасных территориях юга Западной

- Сибири с применением геоинформационных технологий. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. №4. С. 129–136.
7. *Тельнова Н.О.* Выявление и картографирование многолетних трендов NDVI для оценки вклада изменений климата в динамику биологической продуктивности агро-экосистем лесостепной и степной зон Северной Евразии. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. №6. С. 97–107.
 8. *Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Курдянов А.В., Круглов В.Б., Мазена В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М.* Методы дендрохронологии. Ч. I. Красноярск: Изд-во КрасГУ, 2000. 80 с.
 9. *Arzac A., Babushkina E.A., Fonti P., Slobodchikova V., Sviderskaya I.V., Vaganov E.A.* Evidences of wider latewood in *Pinus sylvestris* from a forest-steppe of Southern Siberia. *Dendrochronologia*. 2018. V. 49. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.dendro.2018.02.007.
 10. *Coulthard B.L., Touchan R., Anchukaitis K.J., Meko D.M., Sivrikaya F.* Tree growth and vegetation activity at the ecosystem-scale in the eastern Mediterranean. *Environmental Research Letters*. 2017. No 12. 084008. DOI: 10.1088/1748-9326/aa7b26.
 11. *Ferguson C.W.* A 7104-year annual tree-ring chronology for Bristlecone pine, *Pinus aristata*, from the White Mountains, California. *Tree-Ring Bull.* 1969. V. 29. No 3–4. P. 3–29.
 12. *Liu R., Song Y., Liu Y., Li X., Song H., Sun C., Li Q., Cai Q., Ren M., Wang L.* Changes in the Tree-Ring Width-Derived Cumulative Normalized Difference Vegetation Index over Northeast China during 1825 to 2013 CE. *Forests*. 2021. No 12. 241. DOI: 10.3390/f12020241.
 13. *Malmström C.M., Thompson M.V., Juday G.P., Los S.O., Randerson J.T., Field C.B.* Interannual variation in global-scale net primary production: testing model estimates. *Global Biogeochemical Cycles*. 1997. V. 11. No 3. P. 367–392. DOI: 10.1029/97GB01419.
 14. *Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I. 1973. P. 309–317.
 15. *Rinn F.* TSAP V3.5. Computer program for tree-ring analysis and presentation. Heidelberg: Frank Rinn Distribution, 1996. 264 p.
 16. *Vicente-Serrano S.M., Camarero J.J., Olano J.M., Martín-Hernández N., Peña-Gallardo M., Tomás-Burguera M., Gazol A., Azorin-Molina C., Bhuyan U., Kenawy A.* Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale. *Remote Sensing of Environment*. 2016. 187. P. 14–29. DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.001.
 17. *Wang J., Rich P.M., Price K.P., Kettle W.D.* Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains. *Int. J. Remote Sensing*. 2004. V. 25. No 16. P. 3127–3138. DOI: 10.1080/0143116032000160499.
 18. *Wang W. Z., Liu X.H., Chen T., An W., Xu G.* Reconstruction of regional NDVI using tree-ring width chronologies in the Qilian Mountains, northwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*. 2010. V. 34. No 9. P. 1033–1044. DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.09.004.

REFERENCES

1. *Arzac A., Babushkina E.A., Fonti P., Slobodchikova V., Sviderskaya I.V., Vaganov E.A.* Evidences of wider latewood in *Pinus sylvestris* from a forest-steppe of Southern Siberia. *Dendrochronologia*. 2018. V. 49. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.dendro.2018.02.007.
2. *Coulthard B.L., Touchan R., Anchukaitis K.J., Meko D.M., Sivrikaya F.* Tree growth and vegetation activity at the ecosystem-scale in the eastern Mediterranean. *Environmental Research Letters*. 2017. No 12. 084008. DOI: 10.1088/1748-9326/aa7b26.

3. *Ferguson C.W.* A 7104-year annual tree-ring chronology for Bristlecone pine, *Pinus aris-tata*, from the White Mountains, California. *Tree-Ring Bull.* 1969. V. 29. No 3–4. P. 3–29.
4. *Liu R., Song Y., Liu Y., Li X., Song H., Sun C., Li Q., Cai Q., Ren M., Wang L.* Changes in the Tree-Ring Width-Derived Cumulative Normalized Difference Vegetation Index over Northeast China during 1825 to 2013 CE. *Forests.* 2021. No 12. 241. DOI: 10.3390/f12020241.
5. *Malmström C.M., Thompson M.V., Juday G.P., Los S.O., Randerson J.T., Field C.B.* Interannual variation in global-scale net primary production: testing model estimates. *Global Biogeochemical Cycles.* 1997. V. 11. No 3. P. 367–392. DOI: 10.1029/97GB01419.
6. *Mordkovich V.G.* Steppe ecosystems. Novosibirsk. 2014. 170 p. (in Russian).
7. *Nemtseva L.D., Bespalova L.A., Golubeva E.I., Mikhailov S.I.* Assessment of the status of vegetation cover of dry steppe landscapes under the conditions of cattle grazing applying the methods of remote sensing of the Earth. *Proceedings of the Southern scientific center of the Russian Academy of Sciences.* 2018. V. VII. P. 151–164 (in Russian). DOI: 10.23885/1993-6621-2018-7-151-164.
8. *Pravdin L.F.* Scots Pine. Variability, intraspecific systematics and selection. Moscow: Nauka, 1964. 191 p. (in Russian).
9. *Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I. 1973. P. 309–317.
10. *Rinn F.* TSAP V3.5. Computer program for tree-ring analysis and presentation. Heidelberg: Frank Rinn Distribution, 1996. 264 p.
11. *Sajb E. A., Bezborodova A. N., Solov'ev S. V., Miller G.F., Filimonova D.A.* Identification of different age fallows on erosion-hazardous territories of the south of Western Siberia using geo-information technologies. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2020. V. 17. No 4. P. 129–136 (in Russian).
12. *Shijatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Hantemirov R.M.* Metody dendrohronologii (Methods of dendrochronology). V.I. Krasnojarsk: Krasnojarsk University Publ., 2000. 80 p. (in Russian).
13. *Telnova N.O.* Revealing and mapping long-term NDVI trends for the analysis of climate change contribution to agroecosystems' productivity dynamics in the Northern Eurasian forest-steppe and steppe. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2017. V. 14. No 6. P. 97–107 (in Russian).
14. *Vangnic P.R.* Pine belt Forests. Moscow: Goslesbumizdat, 1953. 153 p. (in Russian).
15. *Vicente-Serrano S.M., Camarero J.J., Olano J.M., Martín-Hernández N., Peña-Gallardo M., Tomás-Burguera M., Gazol A., Azorin-Molina C., Bhuyan U., Kenawy A.* Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale. *Remote Sensing of Environment.* 2016. 187. P. 14–29. DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.001.
16. *Wang J., Rich P.M., Price K.P., Kettle W.D.* Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains. *Int. J. Remote Sensing.* 2004. V. 25. No 16. P. 3127–3138. DOI: 10.1080/0143116032000160499.
17. *Wang W. Z., Liu X.H., Chen T., An W., Xu G.* Reconstruction of regional NDVI using tree-ring width chronologies in the Qilian Mountains, northwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology.* 2010. V. 34. No 9. P. 1033–1044. DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.09.004.
18. *Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Ulanova S.S., Fedorova N.L.* Ground-based and satellite investigation of production of pastures in Kalmykia that vary in degree of vegetation degradation. *Arid Ecosystems.* 2013. V. 3. No 4. P. 212–219.