

Экологическое состояние лиственничников в экотоне лесотундры Западной Сибири (на примере долины р. Монгаюрбей)

А. В. ФАХРЕТДИНОВ, С. П. АРЕФЬЕВ, Д. В. МОСКОВЧЕНКО

Тюменский научный центр СО РАН, ИПОС
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86
E-mail: arthurfahretdinov@gmail.com

Статья поступила 17.11.2021

После доработки 14.12.2021

Принята к печати 08.02.2022

АННОТАЦИЯ

По данным дистанционного зондирования и материалам древесно-кольцевых хронологий изучено экологическое состояние экстразонального лиственничного редколесья в долине р. Монгаюрбей (Тазовский полуостров). Участок представляет собой один из самых северных в Западной Сибири анклавов таежной растительности. Анализ космоснимков Terra-MODIS с 2000 по 2020 г. показал, что величина вегетационного индекса ($NDVI_{mean}$), отражающего среднее количество фотосинтетически активной фитомассы за летний период, в наибольшей степени зависит от среднелетней температуры воздуха (коэффициент корреляции $R = 0,69$). Однако, несмотря на устойчивый тренд к росту летних температур, статистически значимый тренд вегетационного индекса отсутствует, что связано с инертностью кустарничково-мохово-лишайникового напочвенного покрова. Соотнесение максимальных за год значений вегетационного индекса ($NDVI_{max}$) с абсолютной шириной колец (TRW) *Larix sibirica* Ledeb. выявило тесную связь ($R = 0,72$) на краевом приводораздельном участке, где располагается молодая древостой, имеющий наибольшую сомкнутость крон и обильный подрост. В долинных участках, напротив, наблюдается дигрессия древостоя, связанная с ухудшениями природных условий (изменение дренажа, почвенных характеристик, мерзлотно-геохимической обстановки). При продолжении потепления можно ожидать распространение лиственничника из поймы реки на водораздел, что подтверждает современное движение к северу границы лесной растительности.

Ключевые слова: *Larix sibirica*, тундра, NDVI, изменение климата, дендрохронология, Тазовский полуостров.

В последние десятилетия отмечается смещение границы лесной растительности на север в результате меняющихся климатических условий [Kharuk et al., 2010; Kaarlejärvi et al., 2012]. Доказано продвижение границы лесов и увеличение площади редколесий в горах Полярного Урала [Shiyatov et al., 2005; Шиятов, 2009; Шиятов, Мазепа, 2015]. На

Тазовском полуострове (Западная Сибирь) отмечалось массовое продвижение на север отдельных взрослых деревьев и подростов лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.), северная граница предтундровых редколесий сместилась за 30-летний период на 10–30 км к северу [Дроздов и др., 2010]. В южной части п-ова Таймыр установлено возрастание сом-

кнутости лиственничников (на 65 %) и продвижение лиственницы в тундру со скоростью 3–10 м/год [Харук и др., 2004, 2005, 2006]. На плато Путорана площадь редколесий увеличилась на 60 % в течение 30 лет за счет увеличения сомкнутости деревьев в редицах главным образом вдоль речной долины [Им, Харук, 2013]. “Внедрение” деревьев в тундры происходит в основном по долинам рек, где наиболее благоприятны микроклиматические и дренажные условия для произрастания [Хантемиров и др., 2008; Сергиенко, 2015].

В зоне тундр, по данным [Miles, Esau, 2016], древесная растительность занимает около 2 % площади, поэтому каждый лесной массив является уникальным природным объектом. Одним из таких примеров произрастания лесных сообществ в тундре является лиственничный лес в долине р. Монгаюрбей, протекающей в восточной части Тазовского полуострова. Лиственничник реки Монгаюрбей – один из самых северных в Западной Сибири анклавов лесной растительности [Арефьев, 2007, 2016].

Ранее [Московченко и др., 2017] был проведен анализ геоэкологических условий этого участка, выполнена дендрохронологическая индикация экологического состояния древостоя и его реакции на климатические изменения. Отмечена тенденция к увеличению ширины годичных колец древесины в условиях потепления климата, периодически нарушаемая в отдельные годы неблагоприятными погодными условиями и антропогенным воздействием. Схожие исследования проводились на массиве Ары-Мас (п-ов Таймыр), где также отмечается общее увеличение продукции древесины лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) за счет положительного тренда увлажнения при стабильном термическом режиме, но в то же время наблюдается ряд других климатических и биотических факторов, замедляющих рост древостоя [Рудинский, 2013].

Лиственничник находится на территории Юрхаровского нефтегазоконденсатного месторождения, неподалеку расположены разведочные скважины, что может представлять угрозу лесному сообществу. Малая устойчивость к различным формам воздействия, свойственная видам, находящимся на краю ареала, требует повышенного внимания к изучению данного

фитоценоза, оценки его экологического состояния и прогноза изменения под влиянием климатических и антропогенных факторов.

Одним из основных методов для оценки динамики растительного покрова на границе тундры и тайги является космический мониторинг. Использование космоснимков позволяет объективно оценить происходящие изменения в силу таких достоинств, как охват больших территорий, высокая оперативность, возможность многократно наблюдать исследуемые участки, достоверность и простота получения информации [Бондур, 2010]. С использованием космоснимков проведена оценка динамики границы между тундрой и тайгой в Центральной Сибири [Ranson et al., 2004]. На основе материалов съемки Landsat и Corona установлено увеличение сомкнутости лиственничников и их продвижение в тундру [Харук и др., 2005]. Очень часто для оценки динамики растительности тундр и северной тайги используют вегетационные индексы, прежде всего NDVI, который характеризует количество фотосинтетически активной биомассы. NDVI вычисляется по разности спектральной яркости между красным и ближним инфракрасным диапазонами (каналами). Использование вегетационных индексов выявило “позеленение” тундр в полярных регионах Земли [Fraser et al., 2014; Pattison et al., 2015].

Оценки многолетних трендов вегетационного индекса в северных районах Западной Сибири весьма противоречивы. Отмечено, что максимальных значений в зоне тайги NDVI достигал в 1997 г., а в зоне тундры – в 2001 г., после чего в обеих природных зонах наблюдалось снижение абсолютных значений индекса [Зуев, 2019]. На п-ове Ямал за 26 лет спутниковых наблюдений с использованием снимков AVHRR не выявлено значимых трендов в динамике NDVI [Walker et al., 2009]. По данным [Елсаков, Телятников, 2013], в тундрах Западной Сибири рост индекса наблюдался на 18,7 % территории, падение – на 20,2 %. За период 2000–2014 гг. по данным снимков MODIS прослеживается практически повсеместное “позеленение” в тундре и лесотундре Западной Сибири и, напротив, снижение значений NDVI в таежной зоне [Esau et al., 2016]. Вероятно, различные сообщества по-разному реагируют на современные климатические изменения.

Также имеет место тот факт, что с изменением длительности ряда наблюдений оценка трендов часто изменяется.

Целью настоящей работы является оценка экологического состояния и устойчивости экстразонального растительного сообщества – лиственничника р. Монгаюрбей. Для этого с использованием дендрохронологических рядов исследована история развития лиственничника и определено влияние климатических изменений на состояние древостоев. Для оценки современной динамики проведен анализ изменения вегетационных индексов и исследована их зависимость от климатических параметров. Выявление зависимостей между приростом древесины, величинами вегетационных индексов и климатическими характеристиками может быть основой для прогноза динамики растительности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Лиственничное редколесье исследовано в 2020 г. в месте слияния рек Монгаюрбей и Верхняя Харвута (координаты 67°46'52,57" с. ш., 76°38'41,18" в. д.). В административном отношении изучаемый участок располагается на севере Надымского района, приблизительно в 90 км к северо-западу от пос. Тазовский. Руководствуясь схемой геоботанического зонирования Западной Сибири [Ильина и др., 1976], можно отметить, что лиственничник внедрен в зону тундр примерно на 120 км (рис. 1).

Климат района холодный, континентальный. По данным метеостанции пос. Тазовский среднегодовая температура воздуха $-8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Переход от отрицательных среднесуточных температур воздуха к положительным приходится на третью декаду мая, от положительных к отрицательным – на вторую декада сентября. Продолжительность вегетационно-

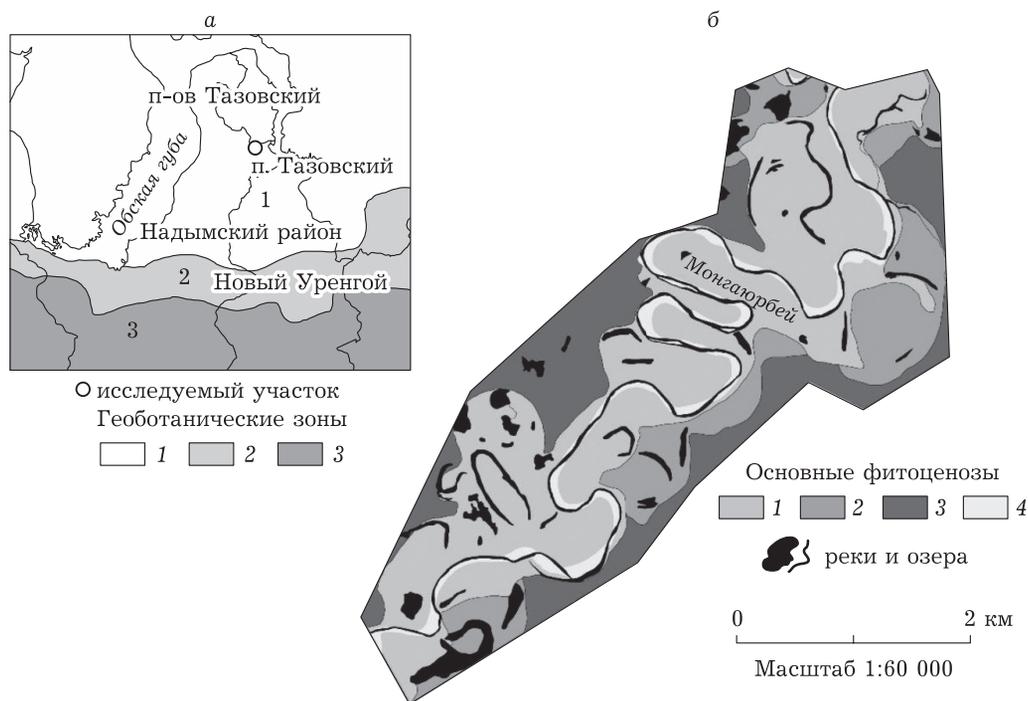


Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемого объекта с типами растительных сообществ: а – геоботанические зоны [Ильина и др., 1985] (1 – тундровая (подзона субарктических тундр); 2 – подзона редколесий, 3 – подзона северной тайги); б – доминирующие фитоценозы (1 – редкостойный лиственничник мшисто-лишайниково-кустарничковый по верхним террасам, лиственничник кустарничково-зеленомощный при участии ольховника на склонах долины и среднесомкнутый лиственничник осоково-кустарничково-лишайниковый с ольховником при участии кустарничковой ивы и ерника на вершинах склонов, 2 – кустарничково-мохово-лишайниковая растительность по буграм и травяно-моховая по понижениям; водораздельные участки: 3 – осоково-кустарничково-лишайниковые растительные сообщества с ивкой и ерником; 4 – открытые группировки на песчаном аллювии)

го периода варьируется от 90 до 100 суток. Средняя температура поверхности почв менее $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$, в летний период от $+1$ до $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Среднее годовое количество осадков составляет 475 мм с максимумом в августе (60 мм) и минимумом в феврале (30 мм). Рассматриваемая территория характеризуется высокими среднегодовыми значениями относительной влажности (более 80 %) и значительным количеством пасмурных дней (до 170). Устойчивый снежный покров в среднем держится 238 дней, образование снега наблюдается в основном в конце первой декады октября, разрушение – последние числа мая.

Согласно геокриологическому районированию Западной Сибири район исследований расположен в Заполярной зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород и относится к Восточно-Тазовской области, в которой преобладают сильнольдистые грунтовые толщи со слоистыми или сетчатыми криотекстурами [Геокриология..., 1989].

По геоботаническому районированию участок исследования находится в зоне южных (кустарниковых) тундр с преобладанием ивняковых травяно-зеленомошных с участками ерниковых лишайниково-моховых бугорковатых тундр, полигональных и плоскобугристых болот [Атлас..., 2004]. На верхних террасах долины р. Монгаюрбей произрастает разновозрастный лиственничный древостой сомкнутостью 0,3 мшисто-лишайниково-кустарничкового типа с ерником, местами с крупным подростом от 1 м. Единично встречаются суховершинные и полностью усохшие на корню деревья. У старых деревьев обнаружены комлевые гнили центральной части ствола, что свидетельствует о низовых пожарах в прошлом. Судя по относительно свежим пням, в древостое практикуется выборочная рубка деревьев, очевидно, для нужд местного населения – оленеводов.

На склоне долины реки, пересеченном старыми оврагами, лиственничник имеет неравномерную горизонтальную структуру, составлен куртинами деревьев и отдельно стоящими деревьями с поросшими разнотравьем полянами, местами с зарослями ольховника и кустарниковых ив. Подрост лиственницы отмечается единично. Самые старые деревья имеют высокоподнятую крону, у основания стволов есть следы ожогов от низовых пожаров

в прошлом, обнаруживаются развивающиеся от них центральные гнили.

В самой верхней части склона долины и по кромке краевого водораздела горизонтальная структура лиственничника более выровненная, куртины древостоя более крупные с преобладанием хвоща в живом напочвенном покрове, с ольховником в подлеске. К обращенной в тундру опушке высота и возраст деревьев уменьшаются, появляется более обильный разновозрастный подрост лиственницы высотой от нескольких сантиметров до нескольких метров, без резкой границы переходящий в древостой. Визуально состояние древостоя и подростка лиственницы оценивается как хорошее и очень хорошее. Наблюдается ее расселение и расширение площади лесного массива вдоль склона долины и в меньшей степени в направлении окружающей тундры. Примыкающая водораздельная территория в основном включает осоково-кустарничково-лишайниковые растительные сообщества при участии кустарниковой ивы и ерника.

В работе использованы данные дистанционного зондирования – космоснимки спектро-радиометра MODIS (спутник Terra), полученные с официального сайта Геологической службы США (U. S. Geological Survey) для летних периодов (6 космоснимков, каждый с интервалом в 16 дней) с 2000 по 2020 г. (дата первых снимков – 10.06, последних – 30.09, в високосные года – 09.06 и 29.09). Для удобства обработки материалов были использованы тематические продукты MOD 13A1 V6 и MOD 13Q1 V6, обеспечивающие растровое изображение с данными рассчитанных значений NDVI (с учетом атмосферной коррекции) для каждого пикселя, с пространственным разрешением 500 и 250 м соответственно.

Спутниковые изображения обрабатывались в программном комплексе (ПК) QGIS 3.10.14. Получены значения максимальных (NDVI_{max}) и средних ($\text{NDVI}_{\text{mean}}$) величин данного индекса за вегетационный период каждого года для двух типов растительных сообществ: лиственничника речной долины и прилегающей тундровой растительности водораздела. NDVI_{max} с высокой точностью индицирует количество наземной биомассы [Raynolds et al., 2012], что делает его весьма эффективным для оценки изменений растительного покрова. Карта-схема растительных сообществ изученной

местности создана на базе ПК Mapinfo Pro 15.0. С использованием корреляционного анализа исследованы зависимости между климатическими характеристиками и значениями NDVI. Влияние климатических условий на изменчивость параметров состояния лиственничника оценивалось по данным наблюдений метеостанции пос. Тазовский [https://rp5.ru; http://www.meteo.ru]. Учитывались такие показатели, как температура воздуха за летний период, сумма летних осадков, высота снежного покрова за предшествующий зимний период (ноябрь – апрель). Вычисление статистических показателей, корреляционный и регрессионный анализ, а также проверка статистической достоверности межгодовых многолетних трендов NDVI и метеопараметров с использованием теста Манна – Кендалла проводились в приложении Microsoft Excel 2016.

Кольцевые хронологии деревьев и кустарников Субарктики чрезвычайно чувствительны к различным изменениям природной среды, поэтому широко используются в изучении динамики климата. Ближайшие дендрохронологические ряды по лиственнице известны из более южной части Тазовского полуострова [Ваганов и др., 1996]. В ходе дендрохронологических исследований, проведенных для оценки возраста, возрастного состава древостоев, устойчивости и динамики биогеоценозов долины р. Монгаюрбей в связи с изменением NDVI, отобраны керновые образцы древесины лиственницы (43 радиуса) и ольховника (6 радиусов). Отбор проведен возрастным буравом на трех пробных площадях, различающихся по микроклиматическим условиям, режиму увлажнения и описанных выше на верхнем приводораздельном участке, склоне долины и высокой речной террасе. С каждого дерева керны брали по двум радиусам одного диаметра, что облегчало перекрестную датировку, а поскольку синхронные кольца таких радиусов неодинаковы, это увеличивало и статистическую выборку (часть радиусов могла быть отбракована); образцы древесины ольховника были взяты ниже узлов кущения. После зачистки и контрастирования мелом поперечной поверхности кернов ширина колец была измерена под микроскопом МБС-10 с окуляр-микрометром (увеличение 7×8), полученные с отдельных радиусов древесно-кольцевые хронологии

(TRW) проверены перекрестной датировкой [Methods..., 1990; Шиятов и др., 2000].

Обобщенные TRW составлены отдельно по взятым видам по трем указанным выше местопроизрастаниям. Сформированы обобщенные ряды как абсолютного прироста RWA, так и индексированной ширины колец RWI. Хотя стандартизация TRW с целью возрастного “детрендинга” становится неукоснительным требованием, не стоит забывать, что все ее методы, вычлняя нужный аспект, в той или иной степени обедняют и искажают разнобразную информацию, имеющуюся в исходных рядах [Methods..., 1990]. В данном случае обобщенные посредством средней арифметической абсолютные ряды, хотя и содержат концевые искажения в силу разной длины исходных индивидуальных рядов, вполне пригодны для общей характеристики хода роста древостоев с учетом возраста, при этом деревья разных поколений дают всплески обобщенной хронологии, соответствующие максимуму их ювенильной фазы роста. Для сопоставления же с рядами NDVI за 2000–2020 гг. брали конечный отрезок RWA, соответствующий стационарной фазе роста деревьев, на которой возрастной тренд стремится к нулю (им можно пренебречь), причем на этом отрезке не трансформирована дендрохронологическая информация, возможно, важная в контексте исследования NDVI. Заметим, исследования тундровых кустарников Ямала, у которых возрастной тренд радиального прироста почти не выражен, показали, что расчет дендроклиматических корреляций по рядам абсолютной ширины колец дает значения, близкие (а иногда и более высокие) к полученным при их индексации негативной экспонентой или экспоненциальным сплайном [Арефьев, 2015; Арефьев и др., 2017].

Индексация ширины колец по отдельным радиусам проведена методом двойного экспоненциального сплайна с неравными весами [Cook, Peters, 1981; Methods..., 1990; Арефьев и др., 2017]. Для оценки тесноты связи между индивидуальными рядами I использован парный коэффициент корреляции Пирсона r , рассчитан средний межсерийный коэффициент корреляции R (по радиусам разных деревьев), а на его основе для оценки качества обобщенных хронологий – единый популяционный сигнал EPS (пороговый уровень $EPS \geq 0,85$)

[Wigley et al., 1984]. Межсерийный коэффициент корреляции R и условный EPS рассчитаны также для обобщаемых серий индивидуальных рядов абсолютной ширины колец на стационарном отрезке с 1995 по 2020 г.

Также использован коэффициент чувствительности K по Дугласу, изменяющийся в пределах от 0 до 1. Считается, что хорошей чувствительностью характеризуются хронологии со средним коэффициентом по серии выше 0,3 [Ferguson, 1969]. Кроме того, для оценки качества RWI использовано стандартное отклонение S , благоприятно характеризующее ряд при $S > 0,20$ [Ferguson, 1969].

РЕЗУЛЬТАТЫ

За рассматриваемый период (2000–2020 гг.) среднегодовая температура выросла на $3,8^\circ\text{C}$, а температура летнего периода – на $0,8^\circ\text{C}$. Тренд роста среднегодовой температуры статистически достоверен при 95 % уровне значимости. Температура летних месяцев, среднегодовое количество осадков и сумма осадков летнего периода значимого тренда не образуют (рис. 2).

Анализ обобщенных среднегодовых значений индекса NDVI за период с 2000 по 2020 г. показал, что амплитуда колебаний составила 0,11 с минимумом 0,55 в 2010 г. и максимумом 0,66 в 2012 г. (рис. 3). Согласно [Черепанов, Дружинина, 2009], значения $\text{NDVI} > 0,7$ характеризуют “густую растительность”, 0,5–0,7 – “разреженную”, значения 0,025 свой-

ственны “открытой почве”. Таким образом, преобладает разреженная растительность. Средние значения NDVI тундровой растительности и лиственничного редколесья различаются слабо. В среднем за выбранный период значение NDVI лиственничника (0,60) больше, чем на участках прилегающей тундровой растительности лишь на 0,01. Практически отсутствие различий в значениях NDVI для разных типов растительных сообществ обусловлено малой сомкнутостью крон и сходным флористическим составом травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов. Также нужно отметить, что при размере пикселя 250×250 м на него кроме лиственничника попадают и фрагменты тундровых сообществ.

Межгодовая динамика NDVI в значительной степени зависит от температуры воздуха в период вегетации. В 2010 г. отмечено позднее холодное лето, средняя температура июня по данным метеостанции пос. Тазовский составила $+5,4^\circ\text{C}$ при среднем значении за период 2000–2020 гг. $+10^\circ\text{C}$, что нашло отражение в низких значениях NDVI. Затем происходило увеличение индекса в течение двух лет, обусловленное заметным увеличением среднегодовой температуры воздуха. Величина коэффициента парной корреляции между $\text{NDVI}_{\text{mean}}$ и средней температурой летнего периода составила 0,69 при $F > 0,01$. В работе [Walker et al., 2009] отмечается, что такая связь между данными параметрами с учетом сильных летних температурных градиентов стала заметнее на севере Западной Сибири в послед-

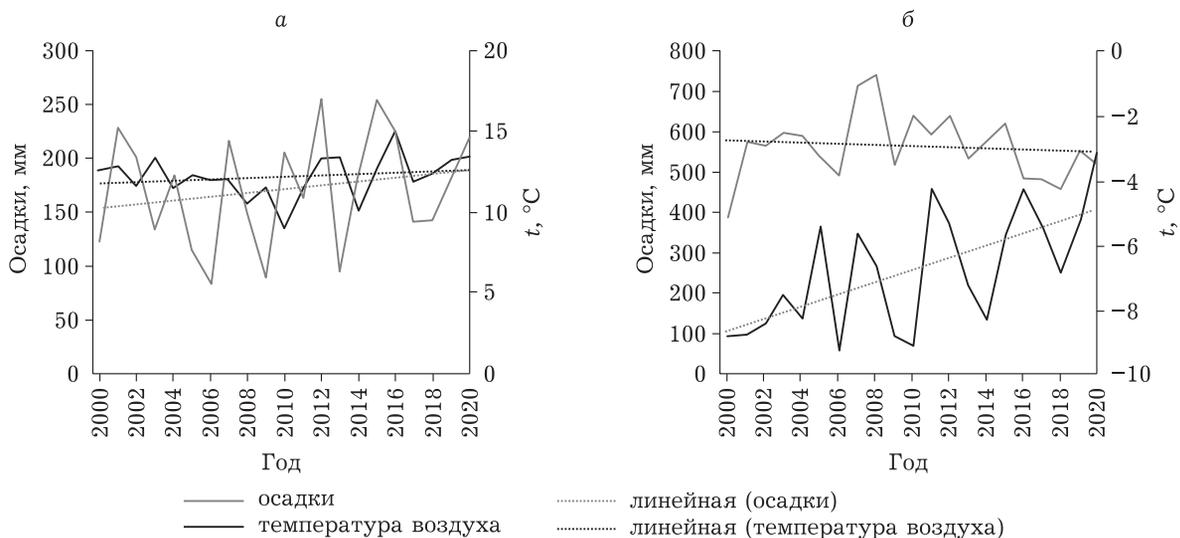


Рис. 2. Динамика средних значений температуры воздуха и осадков за летний период (а) и за год (б)

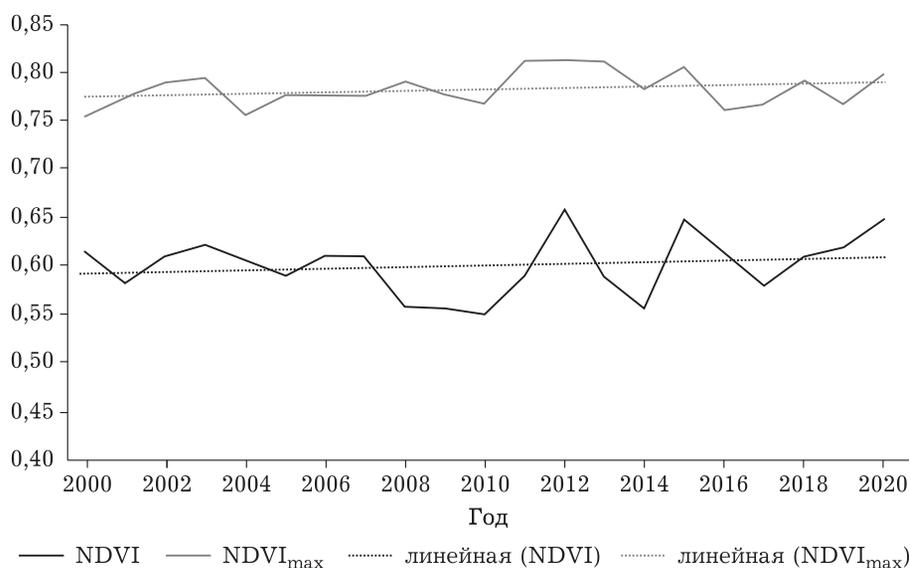


Рис. 3. Погодичная динамика значений $NDVI_{mean}$ и $NDVI_{max}$ за вегетационный период (2000–2020 гг.)

нее время. Более слабая связь установлена между $NDVI_{mean}$ и суммой летних осадков (0,42; $p > 0,10$). Коэффициент детерминации ($r^2 = 0,48$; $F < 0,05$) показал, что практически в 50 % изменчивость $NDVI_{mean}$ обусловлена летними температурами, в то время как лишь на 18 % – летними осадками ($r^2 = 0,18$; $F > 0,05$).

20-летний тренд изменения вегетационных индексов положительный, но выражен слабо (см. рис. 3). Проверка с использованием теста Манна – Кендалла показала, что тренд статистически незначим. Данные в целом подтверждают мнение, что статистически значимые тенденции в увеличении NDVI наблюдаются лишь на небольшой доле территорий севера Западной Сибири [Esau et al., 2016]. Нужно отметить, что ход $NDVI_{max}$ имеет скачкообразный характер, сильно выраженный после 2010 г., что говорит о нарастании нестабильности климатических показателей (см. рис. 3).

Таким образом, на обследованной территории, несмотря на рост температуры воздуха, судя по анализу NDVI, не отмечено значимого тренда роста фотосинтетически активной фитомассы. “Отставание” реакции фитоценозов от климатических показателей в целом свойственно тундровой растительности. За период 1982–2008 гг. в Арктике теплообеспеченность увеличилась на 21 %, а индекс NDVI, характеризующий количество фотосинтези-

рующей биомассы, вырос на 7 % [Bhatt et al., 2010]. Низкий рост значений связан с относительной стабильностью сообществ с кустарничково-моховым покровом, слабо реагирующим на изменение климатических показателей [Walker et al., 2009].

Общая характеристика построенных кольцевых хронологий дана в табл. 1. Из ее данных видно, что все построенные хронологии соответствуют критериям качества, часто недостижимым в лесной зоне Западной Сибири, но вполне обычным для Субарктики, где прирост древесных растений жестко лимитирован дефицитом тепла [Ваганов и др., 1996].

Дендрохронологические исследования показали, что на низком орографическом уровне (речная терраса) максимальный возраст лиственницы составляет 180 лет. В древостое отмечены деревья поколений 1840, 1838, 1902, 1926, 1940, 1955, 1963, 1977 гг. На склоне водораздела древостой разновозрастный, максимальный возраст лиственницы 210 лет, представлены поколения 1810, 1825, 1851, 1892, 1977 гг. На верхнем приводораздельном участке древостой молодой, отмечаются поколения 1940, 1959, 1977, 1994 гг. В подлеске произрастает ольховник (*Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar. in Preslia) возрастом до 60 лет.

Хронологии радиального прироста лиственницы свидетельствуют, что на пойменной террасе радиальный прирост старше-

Общая характеристика обобщенных кольцевых хронологий на отрезке 1995–2020 гг.

Участок, вид	Число		Межсерийный R		EPS		K	S
	стволов	радиусов	RWA	RWI	RWA	RWI		
Долина, Лц	10	17	0,46	0,69	0,89	0,96	0,40	0,24
Склон, Лц	8	15	0,60	0,78	0,92	0,97	0,33	0,21
Верх, Лц	7	11	0,49	0,68	0,87	0,94	0,35	0,22
Верх, Ол	3	6	0,66	0,69	0,85	0,87	0,55	0,37

П р и м е ч а н и е. Лц – лиственница сибирская; Ол – ольха кустарниковая.

го поколения лиственницы сначала достигал 3,1 мм и по мере старения деревьев к 1910-м годам он снизился до величин порядка 0,5 мм (рис. 4). В 1916 г. произошло падение прироста почти до нуля, что, очевидно, связано с низовым пожаром. Сохранившиеся после пожара деревья в силу улучшения плодородия почвы резко усилили прирост в 1920-е годы и дали новое поколение лиственницы. Аналогичный пожар произошел в 1934 г. (середина 1930-х годов известна на юге Западной Сибири как засушливые “саранчовые” годы), что вскоре снова повлекло усиление радиального прироста лиственницы до 4,8 мм. Эффект, произведенный пожарами, закончился в 1940-е годы, прирост стал уменьшаться и снизился до критического уровня в 1997 г. с его коротким и холодным вегетационным сезоном. Последствия ослабления лиственницы в этот

год видны по настоящее время и проявляются в тенденции к уменьшению прироста лиственницы на террасе (см. рис. 4). Неблагоприятным в этом плане был и 2020 г.

В хронологиях роста лиственницы на дренированном склоне долины отмечаются те же ключевые моменты, связанные с прохождением пожаров, но здесь прирост не имеет выявленной для террасы негативной тенденции. Напротив, в последние 20 лет наблюдается восстановление роста лиственницы, нарушенное в 1997 г. (см. рис. 4) Более того, по показателю вариации величины радиального прироста, характеризующему устойчивость структуры древостоя, влияние неблагоприятных условий этого года на лиственницу в центральной части массива не было столь сильным. Значительно более сильное изменение структуры древостоя выражено в 2004–2005 гг., что, вероятно,

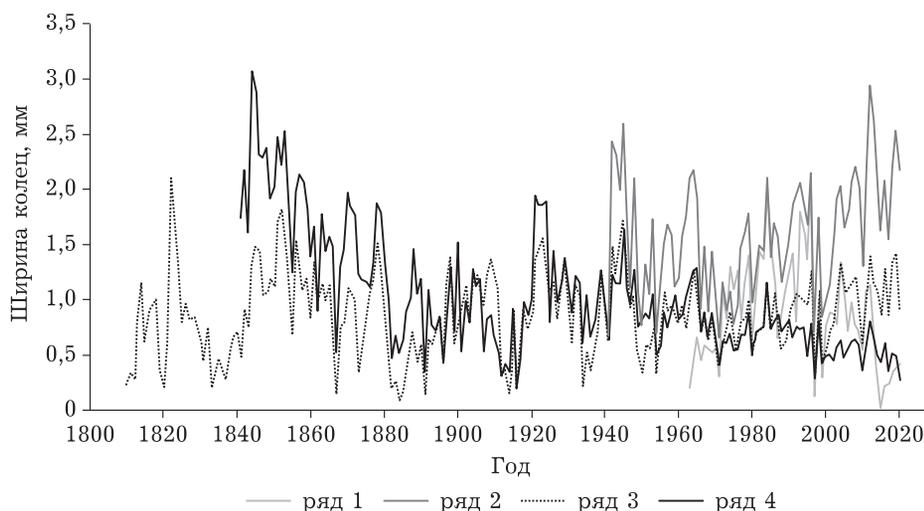


Рис. 4. Хронологии радиального прироста RWA.

Ряды: 1 – ольховник, верхний приводораздельный участок; 2 – лиственница, верхний приводораздельный участок; 3 – лиственница, склон долины; 4 – лиственница, терраса

связано с вырубкой части деревьев. В 2020 г. серьезных колебаний прироста лиственницы на склоне не было.

Распространение лиственницы на верхнюю часть склона в начале 1940-х годов, очевидно, было следствием низового пожара 1934 г., расчистившего почву для появившихся в изобилии семян. В дальнейшем деревья росли здесь в условиях известной тенденции потепления климата и в молодом возрасте сравнительно легко перенесли неблагоприятные вегетационные сезоны конца 1990-х годов. В настоящее время прослеживается отчетливая тенденция к увеличению прироста лиственницы в этой части массива, согласующаяся с наблюдаемым увеличением его площади в ходе расселения лиственницы (см. рис. 4). Напротив, у оказавшегося в подлеске ольховника видна тенденция к уменьшению прироста, что, вероятно, связано с усилением световой и корневой конкуренции со стороны лиственницы.

Таким образом, лиственница, составляющая рассматриваемый лесной массив, первоначально появилась в наиболее благоприятных условиях центральной части склона долины р. Монгаюрбей на исходе “малого ледникового периода” в начале XIX в. В настоящее время сохранились единичные деревья того первого поколения. Вскоре, приблизительно через 20 лет, лиственница стала расти на верхних террасах долины реки, вероятно, к тому времени сформировавшихся и бывших весьма плодородными. Затем плодородие террас деградировало, а плодородие

склона оставалось на прежнем уровне, что отрицательно сказывалось на росте лиственницы на террасе и положительно – на склоне в условиях потепления климата. Прошедшие в 1916 и 1934 гг. низовые пожары несмотря на гибель части древостоя повышали почвенное плодородие, чем способствовали сохранению лиственницы на террасах и расширению площади ее произрастания в склоновой части. В настоящее время лиственница прогрессирует по краевому водоразделу и склоновой части массива, на террасах долины реки наблюдаются признаки некоторой дигрессии лиственничного древостоя.

По данным табл. 2 выявлена существенная связь рядов максимальных NDVI ландшафтов с некоторыми древесно-кольцевыми хронологиями, как абсолютными (для стационарного отрезка с 2000 г.), так и индексированными. Наибольший и довольно высокий уровень связи ($R = 0,72$ при критическом значении $0,42$ для $p = 0,05$) отмечен между $NDVI_{max}$ тундровой растительности и средней абсолютной шириной колец (RWA , мм) лиственницы с прилегающего к тундре приводораздельного участка, где лиственница наиболее молодая (возраст до 40–80 лет) и сомкнутость древостоя наибольшая (рис. 5). Немного ниже связь RWA этого участка с общим $NDVI_{max}$ ($0,67$). Уровень связи $NDVI_{max}$ с RWA лиственницы срединного приводораздельного участка не превышает $0,48$, а с RWA лиственницы из долины еще ниже (не более $0,37$), что можно объяснить отмеченными выше рубка-

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты корреляции рядов $NDVI_{max}$ с хронологиями абсолютной RWA и индексированной RWI ширины колец древесных растений за период 2000–2020 гг.

$NDVI_{max}$ по ландшафтам	Кольцевые хронологии по участкам			
	Долина, Лц	Склон, Лц	Верх, Лц	Верх, Ол
Абсолютная ширина колец RWA				
Лиственничник	0,26	0,14	0,49	0,04
Тундра	0,37	0,48	0,72	-0,01
Общий	0,31	0,42	0,67	-0,16
Индексированная ширина колец RWI				
Лиственничник	0,27	0,19	0,47	0,20
Тундра	0,37	0,50	0,67	0,25
Общий	0,35	0,48	0,59	0,09

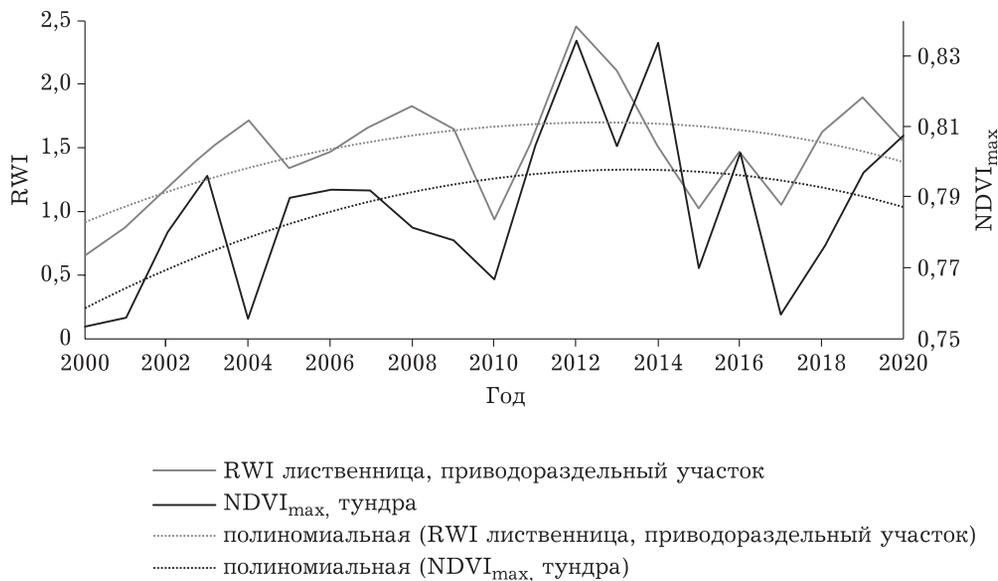


Рис. 5. Динамика NDVI_{max} тундрового участка и RWI лиственницы на смежном приводораздельном участке ($R = 0,67$), с полиномиальными трендами (пунктир)

ми, признаками ее старения на этих участках и деградации древостоя вследствие возможной мерзлотно-геохимической эволюции долинных биотопов. Уровень связи ряда NDVI_{max}, определенного для лиственничника р. Могнаюрбей в целом, с RWA лиственницы оценивается уровнем не более среднего и для лиственницы с верхнего природораздельного участка достигает 0,49.

Близкие к рассмотренным выше значения коэффициентов корреляции с NDVI_{max} рассчитаны и для индексированных древесно-кольцевых хронологий лиственницы. Так, корреляция между тундровым NDVI_{max} и RWI лиственницы с прилегающего к тундре верхнего приводораздельного участка достигает 0,67 (см. рис. 5). Корреляция NDVI_{max} с RWI ольхи кустарниковой не достоверна и не превышает 0,25 при всех возможных значениях i , что, вероятно, связано с нарастающим угнетением ольховника под пологом лиственницы. Достоверных корреляций между рядами средних значений NDVI и рассмотренными кольцевыми хронологиями не отмечено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенные отличия в значениях NDVI между лиственничником и тундровой растительностью не выявлены, что обусловлено малой сомкнутостью крон и сходным флори-

стическим составом травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов. Несмотря на постепенное увеличение среднегодовой и летней температуры воздуха не отмечено достоверного линейного тренда изменения значений индексов NDVI_{mean} и NDVI_{max}. Судя по NDVI, количество фотосинтетически активной фитомассы колеблется от года к году и зависит от благоприятности температурного режима вегетационного периода. Из климатических параметров наибольшее влияние на максимальную величину NDVI оказывает средняя летняя температура, что сильнее всего проявляется на участке “молодого” древостоя ($R = 0,69$). Более низкие значения коэффициентов корреляции на низких ортографических уровнях с более возрастным древостоем свидетельствуют, что там на величину NDVI оказывают влияние иные факторы (изменение геокриологических и гидрологических условий, влияние пожаров природного и антропогенного характера, рубка деревьев, подтопление).

Достоверная корреляционная связь значений NDVI_{max} с абсолютной и индексированной шириной колец лиственницы и на приводораздельном участке (до $R = 0,72$), наличие общих трендов рассматриваемых параметров, а также обильный подрост лиственницы свидетельствуют о ее прогрессировании на этом геоморфологическом уровне в условиях глобального

потепления климата, что подтверждает выводы предшествующих исследований о продвижении древесной растительности на север Западной Сибири, прежде всего вдоль рек. Несмотря на расположенные неподалеку объекты газодобычи состояние лиственничника достаточно устойчиво. Вероятно, при продолжении потепления следует ожидать дальнейшего распространения лиственничника по долине Монгаюрбея и в меньшей степени на прилегающий водораздел.

Исследование выполнено в рамках базового бюджетного проекта ТюмНЦ СО РАН “Западная Сибирь в контексте Евразийских связей: человек, природа, социум” 121041600045-8.

ЛИТЕРАТУРА

- Арефьев С. П. Дендрохронологические исследования и динамика биоты в Тазовской Субарктике // Вестн. экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2007. № 7. С. 85–96.
- Арефьев С. П. Фиксация потепления климата в древесно-кольцевых хронологиях кустарников на севере Ямала и Гыданского полуострова // Журн. Сиб. федерал. ун-та. Сер. Биология. 2015. Т. 8, № 4. С. 377–393.
- Арефьев С. П. Реакция деревьев и кустарников Восточной части Тазовского полуострова на потепление климата // Экол. мониторинг и биоразнообразие. 2016. № 1(11). С. 5–9.
- Арефьев С. П., Хомутов А. В., Ермохина К. А., Лейбман М. О. Дендрохронологическая реконструкция процесса формирования газового бугра на месте Ямальской воронки // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 5. С. 107–119.
- Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск: Омская картограф. фабрика, 2004. 303 с.
- Бондур В. Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Ваганов Е. А., Шиятов С. Г., Мазепа В. С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике. Новосибирск: Наука, 1996. 246 с.
- Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э. Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 454 с.
- Дроздов Д. С., Украинцева Н. Г., Царев А. М., Чекрыгина С. Н. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV, № 1. С. 22–31.
- Елсаков В. В., Телятников М. Ю. Межгодовые изменения индекса NDVI на территории Европейского северо-востока России и Западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Соврем. пробл. дист. зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 3. С. 260–271.
- Зуев В. В. Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982–2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66–76.
- Ильина И. С., Лапшина Е. И., Лавренко Н. Н., Мельцер Л. И., Романова Е. А., Боговяленский Б. А., Махно В. Д. Растительность Западно-Сибирской равнины. Карта масштаба 1:1 500 000. М.: ГУГК, 1976.
- Ильина И. С., Лапшина Е. И., Лавренко Н. Н. и др. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1985. 250 с.
- Им С. Т., Харук В. И. Климатически индуцированные изменения в экотоне альпийской лесотундры плато Путорана // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 5. С. 32–44.
- Московченко Д. В., Арефьев С. П., Глазунов В. А., Тигеев А. А. Изменение состояния растительности и геокриологических условий Тазовского полуострова (восточная часть) за период 1988–2016 гг. // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 6. С. 3–13.
- Рудинский М. Г. Факторы, определяющие радиальный прирост лиственницы на северном пределе распространения (массив Ары-Мас, п-ов Таймыр) // Изв. Иркут. гос. ун-та. Серия: Биология. Экология. 2013. Т. 6, № 3. С. 34–41.
- Сергиенко В. Г. Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменения климата // Тр. Санкт-Петербургского науч.-исслед. ин-та лесн. хоз-ва. 2015. № 1. С. 5–19.
- Хантемиров Р. М., Сурков А. Ю., Горланова Л. А. Изменения климата и формирование возрастных поколений лиственницы на полярной границе леса на Ямале // Экология. 2008. № 5. С. 323–328.
- Харук В. И., Им С. Т., Рэнсон К. Дж., Наурызбаев М. М. Временная динамика лиственницы в экотоне лесотундры // Докл. АН. 2004. Т. 398, № 3. С. 404–408.
- Харук В. И., Им С. Т., Рэнсон К. Дж., Сан Г. Космоснимки высокого разрешения в анализе временной динамики экотона лесотундры // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 6. С. 46–55.
- Харук В. И., Рэнсон К. Дж., Им С. Т., Наурызбаев М. М. Лиственничники лесотундры и климатические тренды // Экология. 2006. № 5. С. 323–331.
- Черепанов А. С., Дружинина Е. Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.
- Шиятов С. Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 216 с.
- Шиятов С. Г., Комин Г. Е. Итоги дендрохронологических исследований в восточных районах страны за 1968–1982 гг. и перспективы их развития // Дендрохронология и дендроклиматология. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. С. 3–19.
- Шиятов С. Г., Мазепа В. С. Современная экспансия лиственницы сибирской в горную тундру Полярного Урала // Экология. 2015. № 6. С. 403–410.
- Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В. С., Наурызбаев М. М., Хантемиров Р. М. Методы дендрохронологии. Ч. 1: Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: учеб.-методич. пособие. Красноярск: Изд-во Красноярского гос. ун-та, 2000. 80 с.
- Bhatt U. S., Walker D. A., Reynolds M. K. et al. Circumpolar Arctic tundra vegetation change is linked to sea ice decline // Earth Interactions. 2010. Vol. 14, N 8. <https://doi.org/10.1175/2010EI315.1>.

- Cook E., Peters K. The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies // *Tree-Ring Bulletin*. 1981. Vol. 41. P. 45–53.
- Esau I., Miles V. V., Davy R., Miles M. W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. Vol. 16, N 15. P. 9563–9577.
- Ferguson C. W. A 7104-years annual tree-ring chronology for bristlecone pine, *Pinus aristata*, from the White Mountains, California // *Tree-Ring Bull.* 1969. Vol. 29, N 3/4. P. 3–29.
- Fraser R. H., Lantz T. C., Olthof I. et al. Warming-Induced Shrub Expansion and Lichen Decline in the Western Canadian Arctic // *Ecosystems*. 2014. Vol. 17. P. 1151–1168.
- Kaarlejärvi E., Baxter R., Hofgaard A. et al. Effects of Warming on shrub abundance and chemistry drive ecosystem-level changes in a forest–tundra ecotone // *Ecosystems*. 2012. Vol. 15. P. 1219–1233.
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Dvinskaya M. L., Im S. T. Siberian pine and larch response to climate warming in the southern Siberian mountain forest: tundra ecotone // *Environmental Change in Siberia* / Ed. H. Balzter. Dordrecht: Springer, 2010. P. 115–132.
- Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences / Eds.: E. R. Cook, L. A. Kairiukstis. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 394 p.
- Miles V. V., Esau I. Spatial heterogeneity of greening and browning between and within bioclimatic zones in northern West Siberia // *Environ. Res. Lett.* 2016. Vol. 11, N 11. P. 115002.
- Pattison R. R., Jorgenson J. C., Reynolds M. K. et al. Trends in NDVI and tundra community composition in the Arctic of NE Alaska between 1984 and 2009 // *Ecosystems*. 2015. Vol. 18. P. 707–719.
- Ranson K. J., Sun G., Kharuk V. I., Kovacs K. Assessing tundra-taiga boundary with multi-sensor satellite data // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 93, N 3. P. 283–295.
- Reynolds M. K., Walker D. A., Epstein H. E., Pinzon J. E., Tucker C. J. A new estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and AVHRR NDVI // *Remote Sensing Lett.* 2012. N 3. P. 403–411.
- Shiyatov S. G., Terent'ev M. M., Fomin V. V. Spatiotemporal dynamics of forest-tundra communities in the Polar Urals // *Rus. J. Ecol.* 2005. Vol. 36, N 2. P. 69–75. doi: 10.1007/s11184-005-0051-9
- Walker D. A., Leibman M. O., Epstein H. E. et al. Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index // *Environ. Res. Lett.* 2009. N 4. 045004. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045004>
- Wigley T. M. L., Briffa K. R., Jones P. D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology // *J. Climate and Appl. Meteorol.* 1984. Vol. 23. P. 201–213.
- USGS Earthexplorer // <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 01.04.2021).

Ecological assessment of larch sparse trees in the forest tundra ecotone of Western Siberia (on the example of Mongayurbey river valley)

A. V. FAKHRETDINOV, S. P. AREF'EV, D. V. MOSKOVCHENKO

*Tyumen Scientific Centre SB RAS, IPOS
625026, Tyumen, Malygina str., 86
E-mail: arthurfahretdinov@gmail.com*

Ecological condition of extrazonal larch sparse trees in the valley of Mongayurbey river (the Taz peninsula) has been studied on the base of remote sense data and tree-ring chronologies. The site is one of the northernmost enclaves of taiga vegetation in Western Siberia. The analysis of Terra-MODIS satellite images from 2000 to 2020 showed that vegetation index value ($NDVI_{mean}$) revealing average quantity of photosynthetic active phytomass over the summer period depends most on the average annual air temperature (correlation coefficient $R=0.69$). However, there is no statistical significant trend of the vegetation index despite the stable trend in the rising of summer temperatures that is connected to the inertness of the shrub-moss-lichen ground cover. Correlation of maximum vegetation index values ($NDVI_{max}$) and total width rings (TRW) of *Larix sibirica* Ledeb. revealed close link ($R = 0,72$) on the border with the watershed, where is the young tree stand with the most crown density and abundant undergrowth. On the contrary, there is a digression of the tree stand in the valleys areas, associated with deterioration of nature conditions (changes in drainage, soil characteristics, permafrost and geochemical conditions). At continuation warming, we can expect the spread of larch trees from the river floodplain towards watershed that confirms the current movement to the north of the border of forest vegetation.

Key words: *Larix sibirica*, tundra, NDVI, climate change, dendrochronology, Taz peninsula.