

УДК 911.2 (470)

К.Н. Дьяконов¹, Ю.А. Бочкарев²**ДЕНДРОХРОНОИНДИКАЦИЯ ЭВОЛЮЦИИ ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
«БУГРЫ ПУЧЕНИЯ – ТЕРМОКАРСТОВЫЕ ОЗЕРА»**

На основе дендрохронологического анализа кернов лиственницы и кедра, отобранных в лесотундровых (район г. Новый Уренгой) и северотаежных (район г. Надым) ландшафтах Западно-Сибирской равнины, показана динамика и эволюция бугров пучения и термокарстовых озер, образующих парагенетические геосистемы. В лесотундровых и северотаежных ландшафтах на рубеже 1990 – начала 2000 годов на месте современных термокарстовых озер наблюдалась массовая гибель деревьев, в том числе по берегам на границе водной поверхности. В лесотундре периодов дестабилизации не наблюдалось за весь период жизни лиственницы с середины XIX века. В северной тайге грунты были нестабильны в течение всего периода роста деревьев. В двух рассматриваемых типах ландшафта около 2000-го года произошла активизация термокарстовых процессов, обусловленная потеплением и ростом атмосферных осадков. В структуре ландшафтов на несколько процентов увеличилась доля урочищ термокарстовых озер.

Ключевые слова: геосистема, ландшафт, лесотундровый ландшафт, северотаежный ландшафт, парагенетический комплекс, многолетняя мерзлота, бугры пучения, термокарстовое озеро, дендрохроноиндикация

Введение. Проблема изучения последствий изменения климата особенно актуальна для сенсорных территорий арктического и субарктического поясов севера Западно-Сибирской равнины. Потепление обуславливает необратимые процессы деградации мерзлоты и, как следствие, усиление заболачивания и дестабилизацию почвогрунтов, что уже в настоящее время негативно отражается на хозяйственном освоении этой территории [Васильчук с соавт., 2002; Конищев, 2009; Мельников с соавт., 2005; Тумель, Зотова, 2017; Шполянская, 2010; Комплексный мониторинг ..., 2012; Тишков, Кренке, 2015; Nelson et al., 2008; Ulrich et al., 2016 и т. д.].

Анализ наземных и ископаемых остатков древесной растительности для южного Ямала, перекрестно датированных с ныне живущими деревьями, позволил построить долгосрочную региональную древесно-кольцевую хронологию, охватывающую более 7200 лет [Хантемиров, 2009]. Согласно ей, в течение 7000 лет, с 5150 г. до н. э. до 1850 г. н. э. температура воздуха постепенно понижалась, а вслед за ней граница леса отступила на юг более чем на 120 км. Однако с 1850 г. по настоящее время произошло беспрецедентное для последних 7000 лет повышение летних температур воздуха, ранее не наблюдавшееся. По данным многих исследователей, это привело к увеличению густоты современной лесной растительности на северной границе леса Западной Сибири и продвижение ее на север [Хантемиров, 2009; Ваганов, Шиятов, 2005; и др.].

Интенсивность проявления динамических и эволюционных процессов характеризуется простран-

ственной внутриландшафтной и зональной дифференциацией и даже разной направленностью трендов развития. Именно эту специфику на региональном и даже локальном уровнях следует учитывать при проектировании новых геотехнических систем и при решении задач оптимизации сложившегося природопользования.

Постановка проблемы. Тема исследования содержит в том числе четко выраженный теоретический аспект ландшафтоведения. Речь идет о понятии «парагенетический комплекс» (система), которое было обосновано Ф.Н. Мильковым [1966] и развито А.Ю. Ретеюмом [1975], В.В. Козиным [1979] и др. Оно весьма четко характеризует генетическую и динамическую сопряженность геоконплексов типа: «ополья – долинно-зандровые понижения», «водосборные воронки – днища и склоны балок – конусы выноса материала (делювиально-пролювиальные шлейфы)». Вероятно, сочетание «бугры пучения – термокарстовые озера» относятся к указанному типу парагенезисов. Именно они определяют региональную и локальную структуру ландшафтов в районах развития многолетней мерзлоты.

Цель работы – выявить региональные закономерности динамики и эволюции парагенетических систем «бугры пучения – термокарстовые озера» методами дендрохроноиндикации. Тема исследования включает в себя структурное, эволюционное и функционально-динамическое направления науки о ландшафте. Задачи исследования: 1) выбор репрезентативных участков распространения (формирования) парагенетических систем с традиционным

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, зав. кафедрой, профессор, докт. геогр. н., чл.-корр. РАН; *e-mail*: diakonov.geofak@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, инженер, канд. геогр. н.; Институт криосферы Земли Тюменского научн. центра СО РАН *e-mail*: uboch@yandex.ru

комплексным описанием пробных площадей; 2) отбор и обработка полевого дендрохронологического материала; 3) установление локальных и региональных закономерностей динамики и эволюции бугров пучения и термокарстовых озер.

Методы исследования. Использована общепринятая методика дендрохронологических исследований, адаптированная к задачам ландшафтной дендрохронологии [Дьяконов, Беляков, 2006; Дьяконов, Бочкарев, 2010]. Очевидно, что динамика геосистем бугров пучения связана, прежде всего, с динамикой многолетнемерзлых пород. При увеличении сезонного протаивания происходит дестабилизация и подвижки грунтов, особенно на склонах бугров.

Методика исследования роли экзогенных геоморфологических процессов в динамике геосистем с помощью дендрохронологического метода разработана и применялась в Приэльбрусье В.И. Турманиной [1979] при датировке схода селей и лавин; А.Н. Николаевым [2005] при изучении криогенных процессов в Якутии. После прохождения селя деревья начинают крениться. При этом в направлении крена образуются непропорционально большие годовые кольца. На этом и основывается метод датировки, используемый в работе.

В геосистемах с каждого дерева (*Larix sibirica* Ledeb и *Pinus sibirica* Du Tour) отобраны керны буром Пресслера с двух-трех противоположных радиусов ствола на уровне груди. Бурение осуществлялось по направлению крена дерева. Для измерения ширины колец была применена система измерения ширины годовых колец LINTAB 5. Кроме того, ширина колец измерялась по отсканированным изображениям кернов с помощью модуля Cybis Coorecorder (версия 2.0.14), входящего в пакет программ для статистической обработки дендрохронологических серий ITRDB (International Dendrochronological Library). Затем производилось перекрестное датирование. По каждой исследуемой геосистеме были построены обобщенные хронологии по индексам прироста с вычленением возрастных кривых с использованием программы ARSTAN [Cook, 1985; Cook et al., 1990].

После получения рядов приростов по противоположным радиусам рассчитывались ряды модуля разности прироста за каждый год по радиусам ствола отдельного дерева. Затем построены графики усредненных значений (медианы) по всем деревьям данной пробной площади. Если у деревьев за какой-либо период времени наблюдается существенная разница в приростах по двум радиусам, то можно с большой вероятностью сделать вывод о том, что в это время происходили подвижки грунтов. Данная методика применялась Л.И. Агафоновым [2002, 2011]. Кроме этого, использованы методы пошаговой множественной регрессии для выявления влияния различных климатических параметров на динамику термических условий грунтов бугров пучения по данным мониторинга в скважинах.

Объекты исследования и исходный материал. В лесотундре в районе Нового Уренгоя высота буг-

ров составляет 2–3 м. Это сегрегационные минеральные бугры (рис. 1). Они сложены супесями и суглинками с ядром на глубине более 2 м от поверхности. Для большинства слабывпуклых вершинных поверхностей характерны обширные пятна-медальоны и трещины, на склонах – оползневые тела. На них произрастают лиственницы, стволы которых (практически все) имеют крен в разные стороны из-за потери стабильности грунтов. Склоны в основном пологие и покатые, но обращенные к термокарстовым озерам местами крутые, осложненные оползневыми телами.

Растительность на вершинах бугров – лиственничное редколесье воронично-толокнянково-лишайниковое с ерником, на склонах – лиственничное редколесье багульниково-ерниково-осоково-лишайниковое. В прилегающих к буграм термокарстовых котловинах – озера с затопленными стволами погибших лиственниц, местами со сфагновыми сплавидами. Практически все стволы лиственниц имеют крен в разные стороны из-за потери стабильности грунтов. Высота лиственниц – 10–12 м, диаметр стволов – 20–30 см.

В северной тайге в районе Надьма были обнаружены минеральные бугры высотой 3–7 м, с признаками разрушения, образующие гряды. Рядом с буграми расположены серии термокарстовых озер со стволами погибших деревьев. Высота бугров составляет 3–7 м. Они покрыты кедровой, местами кедрово-лиственничной рединой с кустарничково-зеленомошно-лишайниково-осоково-багульниковым покровом на минеральных буграх пучения и кустарничково-долгомошно-сфагново-осоково-багульниковым покровом на торфяно-минеральных буграх пучения. Вершинные поверхности плоские и слабонаклонные с кочкарным микрорельефом (высота кочек в среднем до 0,5 м), склоны в основном пологие, реже покатые с хорошо выраженным кочкарно-западным микрорельефом (высота кочек и глубина западин до 1 м). Глубина сезонного протаивания на минеральных буграх составляет в последнее десятилетие около 170–200 см, на торфяно-минеральных буграх – 50–60 см. Возраст деревьев до 300–500 лет, высота 10–15 м, диаметр ствола в среднем 30–40 см. Точный возраст определить было невозможно из-за гнилой сердцевины или отсутствия точного попадания керна в нее. Длина рядов прироста составляла 270–470 лет, в среднем около 150–200 (первая группа бугров) и 370–400 (вторая группа бугров) лет. К этим буграм также прилегают термокарстовые западины, заполненные сфагново-осоковыми болотами и озерами с отмершими затопленными стволами лиственниц и кедров.

На охарактеризованных выше объектах исследования в 2014–2016 гг. для датировки образования термокарстовых озер у затопленных лиственниц и кедров, располагающихся на границе воды и суши, в направлении их крена были отобраны керны с двух противоположных радиусов ствола, что позволило по асимметрии годовых колец определить годы начала крена и дестабилизации грунтов. Для погиб-

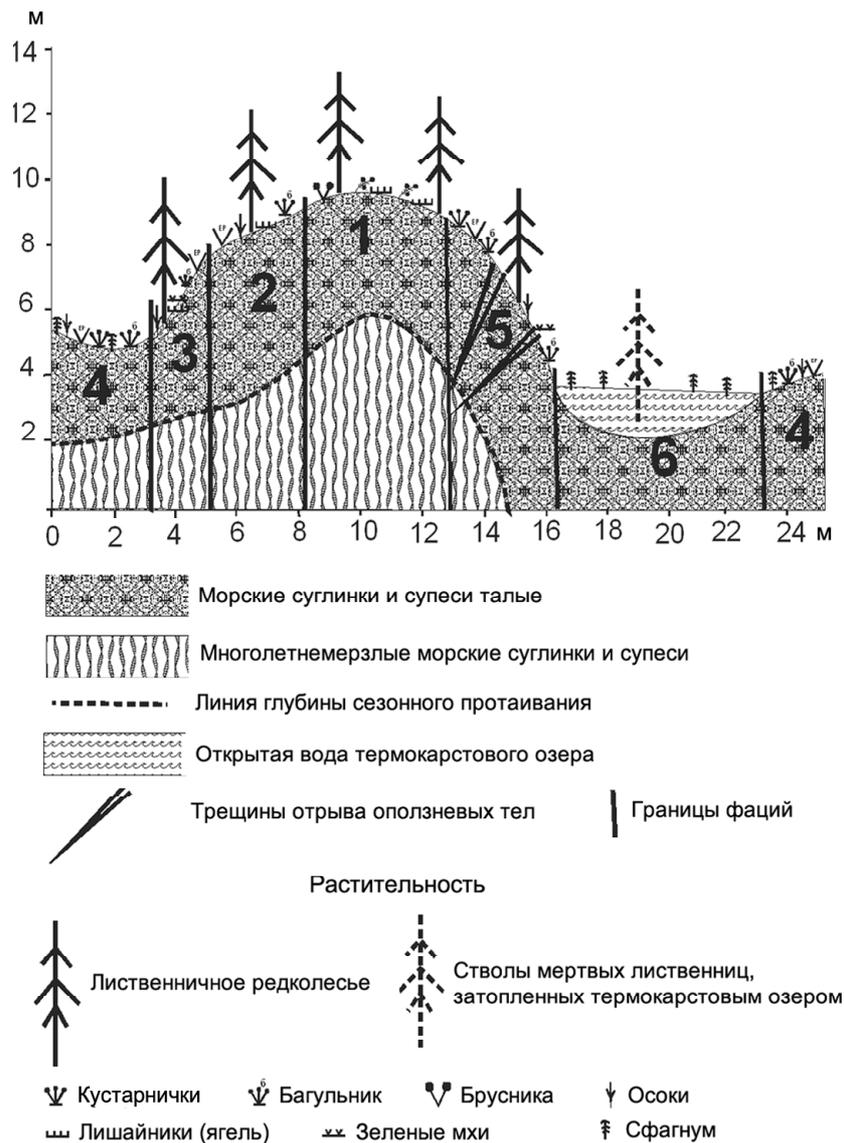


Рис. 1. Схематический ландшафтный профиль через парагенетическую систему «минеральный бугор пучения – термокарстовое озеро» в лесотундре Западной Сибири (район города Новый Уренгой). Фации: 1 – слабовыпуклая вершина бугра пучения, сложенная морскими суглинками, мерзлыми с глубины более 2 м, занятая лиственничным редколесьем воронично-бруснично-лишайниковым с ерником на оподзоленном суглинистом криоземе; 2 – пологий склон бугра пучения, сложенный морскими суглинками, мерзлыми с глубины более 2 м, занятый лиственничным редколесьем багульниково-ерниково-осоково-лишайниковым на суглинистом криоземе; 3 – покатый склон бугра пучения, сложенный морскими суглинками, мерзлыми с глубины более 2 м, занятый лиственничным редколесьем лишайниково-зеленомошно-кустарничково-ерниково-осоково-багульниковым на суглинистом криоземе; 4 – переувлажненные слабоболотистые поверхности морской равнины, осложненные кочковатым микрорельефом и пятнами-медальонами, сложенные морскими суглинками, мерзлыми с глубины более 2 м, местами с маломощными пятнами торфа на кочках, занятые лишайниково-кустарничково-ерниково-осоково-сфагново-багульниковым фитоценозом на оглеенном суглинистом криоземе; 5 – крутой склон бугра пучения, сложенный морскими суглинками, мерзлыми с глубины более 2 м, осложненный трещинами отрыва и оползевыми телами, занятый лиственничным редколесьем зеленомошно-кустарничково-ерниково-осоково-багульниковым на суглинистом криоземе; 6 – термокарстовые озера, глубиной до 1,5 м с затопленными стволами погибших лиственниц, местами со сфагновыми сплавами

Fig. 1. Schematic landscape profile through a paragenetic system of mineral frost mound and thermokarst lake in the forest-tundra of Western Siberia (Novy Urengoy district). Geosystems: 1 – slightly convex top of a frost mound, composed of marine loam, frozen from a depth of more than 2 m, with a larch sparse woodland with cowberry, lichen and yernik on podzolic loamy cryozem. 2 – very gentle slope of a frost mound, composed of marine loam, frozen from a depth of more than 2 m, with larch sparse woodland with wild rosemary, ernik, sedges and lichen on loamy cryozem. 3 – gentle slope of a frost mound, composed of marine loam, frozen from a depth of more than 2 m, with larch sparse woodland with lichen, green moss, dwarf shrubs, ernik, sedges and wild rosemary on loamy cryozem. 4 – wet slightly undulating surfaces of the marine plain with peat bumps and medallion stains, composed of marine loam, frozen from a depth of more than 2 m, with lichen, dwarf shrubs, ernik, sedges and wild rosemary on gley loamy cryozem. 5 – steep slope of a frost mound with fissures and landslide bodies, composed of marine loam, frozen from a depth of more than 2 m, with larch sparse woodland with green mosses, dwarf shrubs, ernik, sedges and wild rosemary on the loamy cryozem. 6 – thermokarst lakes up to 1,5 m deep, with submerged trunks of dead larches and sphagnum bogs

ших деревьев были определены годы гибели с помощью перекрестной датировки с живыми деревьями на буграх. Произведено сравнение времени интенсификации крена у затопленных лиственниц и деревьев с крутых оползневых склонов, прилегающих к озерам.

Результаты исследования и их обсуждение.

Реакция бугров пучения на современные изменения климата и теплового поля почвогрунтов, оказалась неоднозначной: часть бугров начала разрушаться, часть сохранилась без изменений. Бугры, находящиеся на начальных стадиях разрушения, имеют трещины на поверхности, свежие оползни и признаки солифлюкции на склонах (рис. 2).

Произрастающие на них деревья из-за потери стабильности грунтов характеризуются разнонаправленным креном. Следы разрушения выявлены как на молодых (не старше 40 лет), так и на старых буграх пучения, имеющих возраст более 3 тыс. лет. Разрушению старых бугров способствует образование на их поверхности обширных пятен, лишенных лишайникового покрова, что кардинально уменьшает величину альбедо поверхности и в летний период увеличивает поглощенную радиацию. Обнаружены и формы, подтверждающие полное разрушение бугров, – термокарстовые озера, образовавшиеся около 20 лет назад на месте бывших бугров (см. рис. 2). Наиболее стабильными оказа-

лись торфяно-минеральные бугры, сложенные с поверхности отмершим сфагнумом мощностью более 50 см.

Датировка гибели деревьев в термокарстовых озерах в *лесотундре* показала, что часть из них погибла в 2002 и 2003 г., а другая – в период 2014–2016 гг. (рис. 3). В эти же годы произошла резкая интенсификация термокарстового процесса с обводнением. Процесс гибели продолжается и в настоящее время. Об этом свидетельствует то, что у ряда живых лиственниц с одного из радиусов ствола прирост прекратился в 2014 г. Это указывает на продолжение термокарстового процесса. При этом, как видно из графика разности прироста (рис. 4), до этого в лесотундре существенных периодов дестабилизации не наблюдалось за весь период жизни лиственниц с середины XIX в. Итак, в 2000 г. произошла необратимая смена геосистемы в результате направленного процесса потепления и увеличения осадков.

При сравнении графиков разности прироста по двум диаметрам в затопленных днищах термокарстовых западин и на их крутых оползневых склонах в лесотундре видно, что в 2000 г. произошла значительная активизация крена деревьев, ранее не наблюдавшаяся. Однако максимум крена на склонах запаздывает по отношению к днищу на 5 лет и приходится на 2006 г. Все это говорит о продолжении



Рис. 2. Парагенетическая система «разрушающийся бугор пучения – термокарстовое озеро» в лесотундре Западной Сибири

Fig. 2. Paragenetic system of degrading frost mound and thermokarst lake in the forest-tundra of Western Siberia

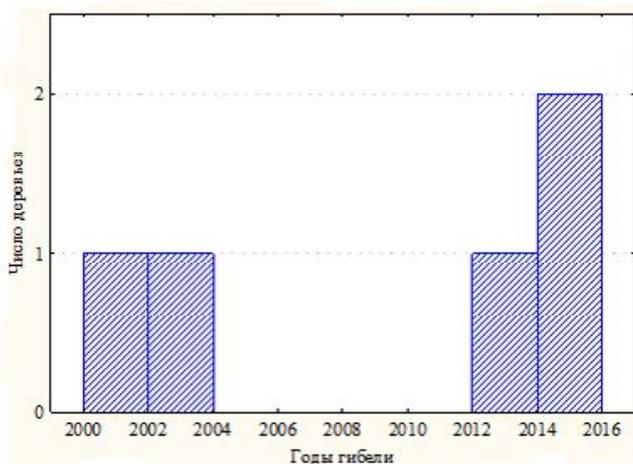


Рис.3. Гистограмма лет гибели затопленных деревьев в термокарстовых озерах в лесотундре Западной Сибири

Fig. 3. Histogram of the years when the inundated trees died in thermokarst lakes in the forest-tundra of Western Siberia

термокарстовых процессов и распространении его на прилегающие бугры пучения, которые разрушаются, о чем свидетельствуют многочисленные свежие оползневые тела на их склонах и трещины отрыва, которые иногда даже расщепляют живые листовенницы на две части.

В северной тайге почти все деревья, произраставшие в центральной части термокарстового озера и по его берегам погибли в конце 1990-х, начале

2000-х гг., с максимумом в период 2000–2004 гг. Это указывает на интенсификацию термокарстового процесса (рис. 5).

Изучение крена деревьев, располагающихся в термокарстовом озере в северной тайге (район г. Надым), показало, что в геосистеме, предшествующей термокарстовому озеру, грунты не были стабильны в течение всего периода роста деревьев, так же как и на склонах ныне существующих бугров (рис. 6). Были периоды нестабильности после 1885 г., 1920 г., 1951 г. Последний период начался в 1998–99 г. – это и было началом разрушения геосистемы. В это же время потеряла стабильность вершинная поверхность прилегающего к термокарстовому озеру бугра пучения, которая до этого отличалась относительной стабильностью (см. рис. 6). Таким образом, несмотря на то, что внешне в настоящее время нет признаков разрушения этого бугра, скорее всего, в ближайшее время они появятся. Причиной этих процессов может быть увеличение температуры воздуха. К этому также добавилось резкое увеличение летних осадков в 2002 г., которое явилось причиной резкого обводнения термокарстового озера и гибели основной массы деревьев.

При сравнении динамики термокарстовых озер в лесотундре Нового Уренгоя и в северной тайге в районе Надыма выяснилось, что в обоих случаях около 2000 года произошла резкая активизация термокарстовых процессов, приведшая к затоп-

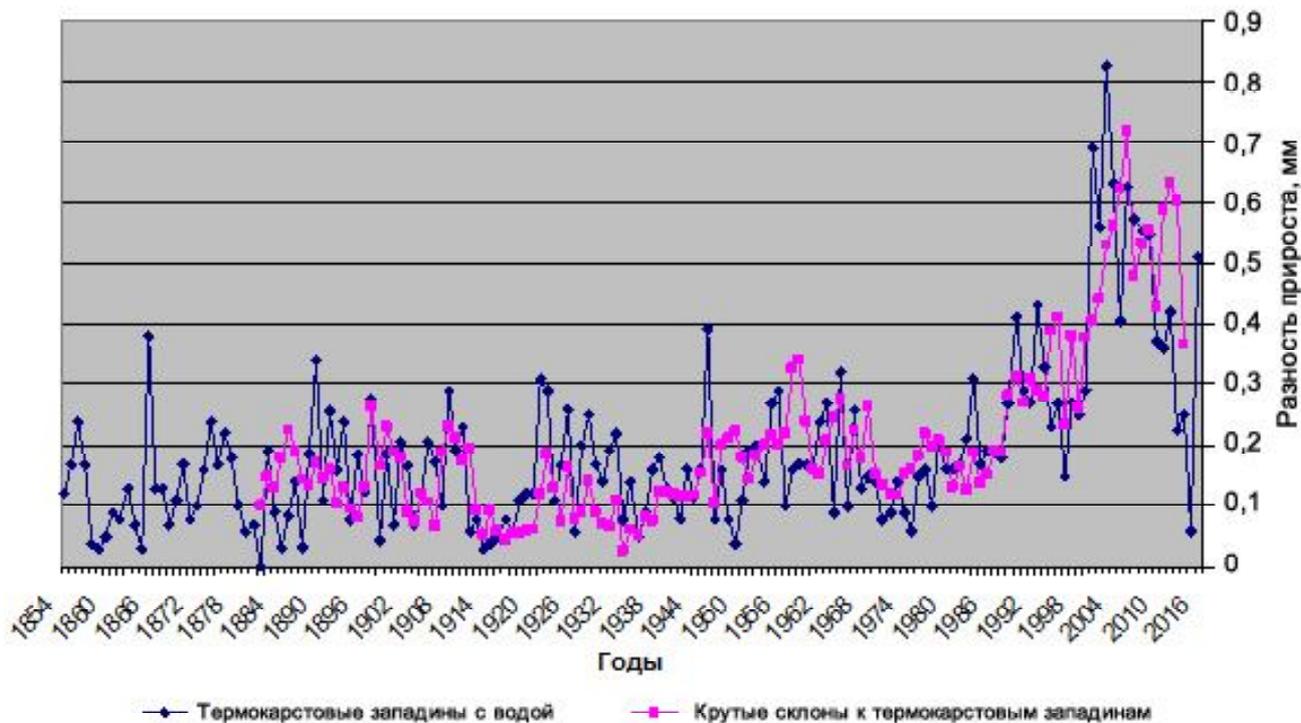


Рис. 4. Средняя разность прироста по двум противоположным радиусам ствола для подтопленных деревьев в термокарстовых озерах и деревьев, произрастающих на крутых оползневых склонах, обращенных к термокарстовым озерам в лесотундре

Fig. 4. Mean difference of tree growth by two opposite radii of the trunk for inundated trees in thermokarst lakes and the trees growing on steep landslide slopes facing the thermokarst lakes in forest-tundra

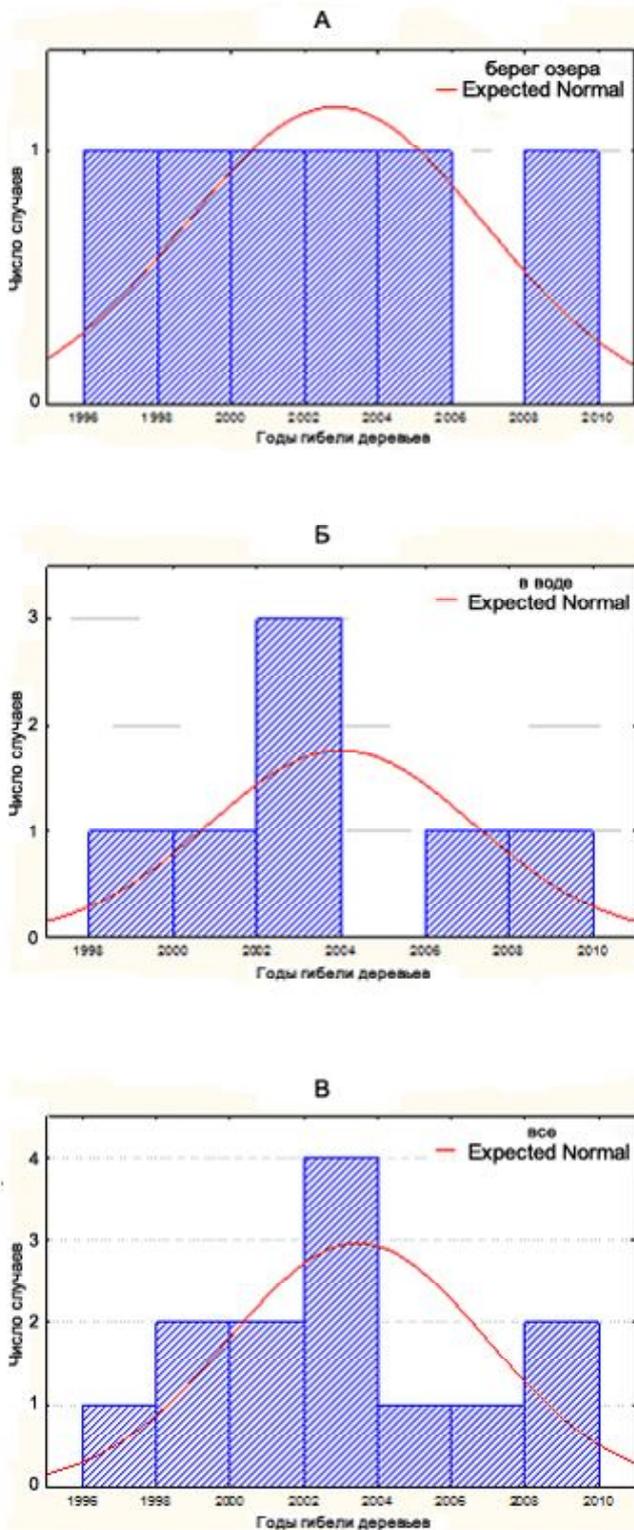


Рис. 5. Гистограммы распределения лет гибели деревьев, подтопленных в термокарстовом озере в северной тайге Западной Сибири: А – в береговой зоне, Б – в центральной обводненной части озера, В – во всех частях озера вместе

Fig. 5. Histogram of the years when the inundated trees died in a thermokarst lake in the northern taiga of Western Siberia: А – in the coastal part, Б – in the central part of the lake, В – totally for the whole lake

лению и гибели деревьев в это время. Однако в северной тайге и ранее наблюдались периоды некоторой нестабильности грунтов геосистемы, предшествующей термокарстовому озеру (это был бугор пучения), а в лесотундре таких периодов нестабильности не наблюдалось – в 2000 г. произошло резкое беспрецедентное разрушение бугров пучения, приведшее к образованию термокарстовых озер.

Выводы:

– анализ древесно-кольцевой структуры деревьев, получивших крен или расщепление ствола в результате криогенных процессов, позволяет с высокой точностью датировать начало и ход этого процесса;

– современное потепление и увеличение летних осадков привело за последние 15 лет к необратимым сменам геосистем ряда минеральных бугров пучения (но не всех) термокарстовыми озерами, чего не наблюдалось, по крайней мере, за последние 250 лет. Особенно отчетливо это проявляется в лесотундре Западной Сибири, начиная с 2000-х годов. Датировка гибели деревьев в термокарстовых озерах лесотундровой зоны отмечена в 2002–2003 и в 2014–2016 гг. в результате интенсификации термокарстового процесса с обводнением, который продолжается и в настоящее время. Это типичные парагенетические системы;

– торфяно-минеральные бугры в северной тайге Западной Сибири отличаются значительной устойчивостью в отличие от минеральных бугров и пока направленно не среагировали на климатические изменения [Бочкарев, 2014]. Это связано со значительными теплоизолирующими свойствами торфяного слоя. У этих бугров наблюдается только циклическая динамика подвижности склонов в рамках инварианта. В целом в северной тайге проявилась большая контрастность в реакции бугров на изменения климата. Часть минеральных бугров подверглась резкому разрушению в начале 2000-х годов, часть из них имеет незначительные признаки дестабилизации, часть относительно стабильна;

– в подзоне северной тайги значительная часть деревьев, произрастающих в центральной части термокарстового озера и по его берегам, погибли в конце 1990-х – начале 2000-х гг. В фациях, предшествующих термокарстовому озеру, грунты не были стабильны в течение всего периода роста деревьев, так же как и на склонах ныне существующих бугров. Выявлены периоды нестабильности после 1885, 1920 и 1951 годов. Разрушение всех геосистем началось в 1998 году;

– фундаментальное физическое обоснование существования парагенетической системы «бугры пучения – термокарстовые озера» требует расчета запасов воды в мерзлом грунте и в озере на начальную стадию формирования системы. Увеличение площади озер и их объема воды может быть связано с ростом атмосферных осадков, что проявляется при потеплении климата. Но эти вопросы – предмет самостоятельного рассмотрения.

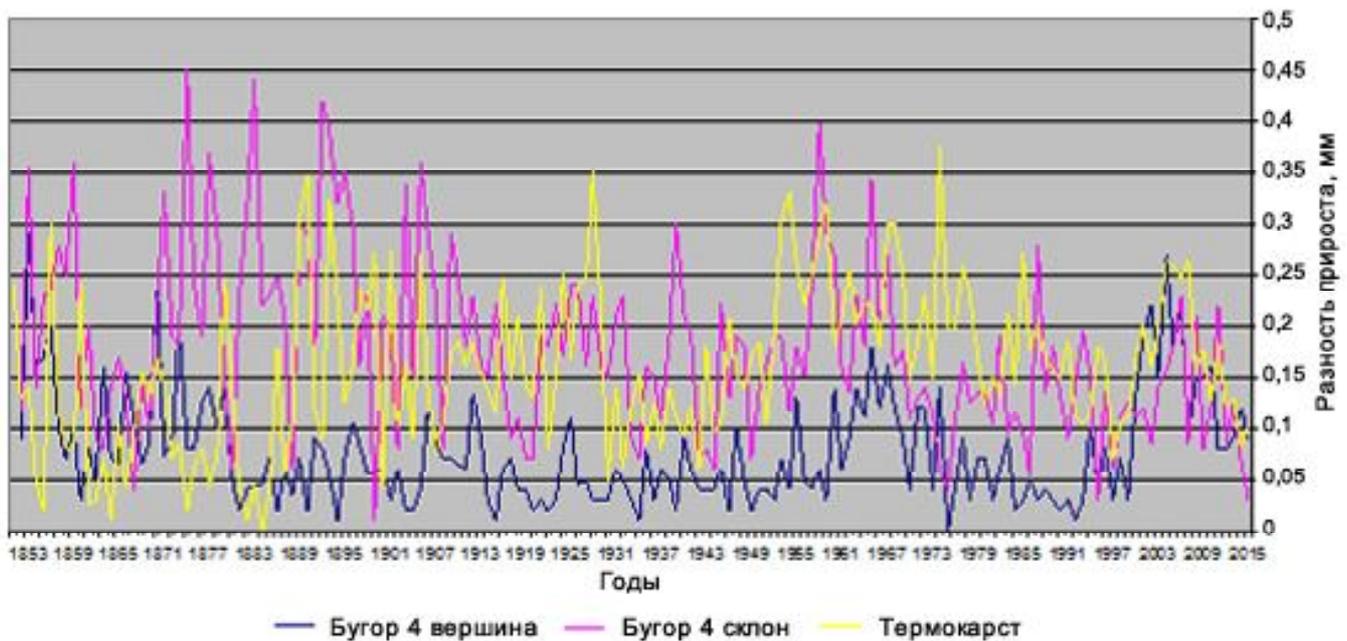


Рис. 6. Средняя разность прироста по двум противоположным радиусам ствола для вершинной и склоновой поверхности бугра, прилегающего к термокарстовому озеру, и для подтопленных деревьев в самом термокарстовом озере (северная тайга Западной Сибири)

Fig. 6. Mean difference of tree growth by two opposite radii of the trunk for the top surface and slopes of a mound adjacent to the thermokarst lake and for inundated trees in the thermokarst lake itself (northern taiga of Western Siberia)

Благодарности. Авторы выражают благодарность за конструктивные замечания и советы ведущему научному сотруднику Л.И. Зотовой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агафонов Л.И., Штрунк Х.Б., Нубер Т.О. Динамика термокарстовой депрессии в Западной Сибири: опыт дендрохронологического исследования // Криосфера Земли. 2002. Т. VI, № 2. С. 43–52.

Агафонов Л.И. Древесно-кольцевая индикация гидролого-климатических условий на севере Западной Сибири. Автореф. дисс. на соискание степени доктора биол. наук. Екатеринбург, 2011. 42 с.

Бочкарев Ю.Н. Многолетняя динамика бугров пучения на севере Западной Сибири по данным дендрохронологии // Вопросы географии. Сб. 138: Горизонты ландшафтоведения. М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. С. 251–270.

Ваганов Е.А., Шиятов С.Г. Дендроклиматические и дендрозоологические исследования в Северной Евразии // Лесоведение. 2005. № 4. С. 18–27.

Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданова Н.А. Голоценовая динамика бугров пучения близ южной границы их ареала как реакция на экстремальные локальные и глобальные изменения // Экстремальные криогенные явления, фундаментальные и прикладные аспекты. Мат-лы Международной конф. Пушино, 2002. С. 135–136.

Дьяконов К.Н., Беляков А.И. Ландшафтно-дендрохронологические исследования: задачи, методы, результаты // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Мат-лы XI Международной ландшафтной конф. / Отв. ред. К.Н. Дьяконов. М.: Географический факультет МГУ, 2006. С. 97–98.

Дьяконов К.Н., Бочкарев Ю.Н. Геофизические факторы динамики радиального прироста деревьев в ландшафтах Западно-Сибирской равнины и Приэльбрусья // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 4. С. 3–9.

Козин В.В. Парагенетический анализ речных долин. Тюмень: Тюм. ГУ, 1979. 88 с.

Коницев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 4. С. 10–20.

Комплексный мониторинг северотаежных геосистем Западной Сибири / Отв. редактор В.П. Мельников. Рос. акад. наук, Сиб. отд., Институт криосферы Земли. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2012. 207 с.

Мельников Е.С., Васильев А.А., Лейбман М.О., Москаленко Н.Г. Динамика сезонного слоя в Западной Сибири // Криосфера Земли. 2005. Т. IX, № 2. С. 23–32.

Мильков Ф.Н. Парагенетические ландшафтные комплексы // Научн. зап. Воронежского отд. Геогр. об-ва СССР, 1966. С. 3–9.

Николаев А.Н. Древесно-кольцевые хронологии как отражение изменений климата // Лес и вечная мерзлота: особенности состава и структуры лесов мерзлотного региона, проблемы рационального ведения хозяйства и охраны. Якутск: Изд-во Якутского ун-та, 2005. С. 25–33.

Ретеюм А.Ю. Физико-географическое районирование и выделение геосистем // Вопросы географии. Сб. 98. Количественные методы изучения природы. М.: Мысль, 1975. С. 5–28.

Тишков А.А., Кренке-мл. А.Н. «Позеленение» Арктики в XXI веке как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения // Арктика: экология и экономика. 2015. № 4(20). С. 28–37.

Тумель Н.В., Зотова Л.И. Геоэкология криолитозоны. Учебное пособие. 2-е изд. М.: Юрайт, 2017. 220 с.

Турманина В.И. Пути восстановления природных условий последнего тысячелетия и основные результаты // Ритмы

гляциальных процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. С. 24–55.

Хантемиров Р.М. Динамика древесной растительности и изменения климата на севере Западной Сибири в голоцене. Автореф. дисс. на соискание степени доктора биол. наук. Екатеринбург, 2009. 42 с.

Шполянская Н.А. Вечная мерзлота и глобальные изменения климата. М.-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2010. 198 с.

Cook E.R. A time series analysis approach to tree-ring standardization // Ph. D. Dissertation. Tucson, AZ: Arizona Univ. Press, 1985. 171 p.

Cook E.R., Briffa K.R., Shiyatov S.G., Mazera V.S. Tree-ring standardization and growth-trend estimation // Methods of

Dendrochronology. Application in the Environmental Sciences. Dordrecht, 1990. P. 104–123.

Nelson F., Shiklomanov N., Hinkel K., Brown J. Decadal Results from the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program // Proc. Of the Ninth Intern. Conf. On Permafrost (Ed. By D.L. Kane, K.V. Hinkel). USA, Univ. Of Alaska, 2008. P. 1273–1280.

Ulrich M., Matthes H., Iijima Y., Schirrmeister L., Fedorov A.N., Schutze J. Quantifying thermokarst and alas lake changes and influencing factors during the last 70 years in Central Yakutia // XI International Conf. on Permafrost. Book of Abstracts, 20–24 June 2016. Potsdam. Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein. P. 916–917.

Поступила в редакцию 28.03.2019

После доработки 08.04.2019

Принята к публикации 15.04.2019

K.N. Diakonov¹, Yu. A.Bochkarev²

DENDROCHRONOLOGICAL INDICATION OF THE EVOLUTION OF «FROST MOUNDS – THERMOKARST LAKES» PARAGENETIC SYSTEM

The dynamics of frost mounds and thermokarst lakes as paragenetic geosystems is described basing on the dendrochronological analysis of larch and cedar cores collected in forest tundra (Novy Urengoy) and northern taiga (Nadym) landscapes of the Western Siberia Plain. During 1990-s – 2000-s there was a massive loss of trees along the shores of modern thermokarst lakes within forest-tundra and northern taiga landscapes. No destabilization periods were recorded in forest-tundra for the whole life cycle of larch since the mid-19th century. In the northern taiga soils were unstable during the entire period of tree growth. Around 2000 there was an activation of thermokarst processes in both landscapes due to warming and increased precipitation. The area of thermokarst lakes in the landscape structure has increased by several percent.

Key words: geosystem, landscape, forest-tundra and northern taiga landscapes, paragenetic complex, permafrost, frost mounds, thermokarst lake, dendrochronological indication

Acknowledgements. The authors would like to thank L.I. Zotova, Leading Scientific Researcher, for her constructive comments and advice.

REFERENCES

Agafonov L., Strunk H., Nuber T. Dinamika termokarstovoy depressii v Zapadnoy Sibiri: opyt dendrokronologicheskogo issledovaniya [Thermokarst hollow dynamics in Western Siberia: insights from dendrochronological research] // Earth's Cryosphere. 2002. Vol. 6. № 2. P. 43–52. (In Russian)

Agafonov L.I. Drevesno-kol'tsevaya indikatsiya gidrologiko-klimaticheskikh usloviy na severe Zapadnoy Sibiri [Tree ring indication of hydro-climatic conditions at northern part of Western Siberia]. Dissertation abstract for the degree of Doctor of Biological Sciences. Ekaterinburg, 2011. 42 p. (In Russian)

Bochkarev Yu.N. Mnogoletnyaya dinamika bugrov pucheniya na severe Zapadnoy Sibiri po dannym dendrokronologii [Long-term frost mounds dynamics in the north of Western Siberia according to a dendrochronological data] // Problems of Geography / Moscow Branch of the Russian Geographical Society. Moscow. Vol. 138: Horizons of landscape science / Executive editors K.N. Dyakonov, V.M. Kotlyakov. Moscow: «Kodeks» Publishing House, 2014. P. 251–270. (In Russian)

Cook E.R. A time series analysis approach to tree-ring standardization // Ph. D. Dissertation. Tucson, AZ: Arizona Univ. Press, 1985. 171 p.

Cook E.R., Briffa K.R., Shiyatov S.G., Mazera V.S. Tree-ring standardization and growth-trend estimation // Methods of Dendrochronology. Application in the Environmental Sciences. Dordrecht, 1990. P. 104–123.

Dyakonov K.N., Beliakov A.I. Landshaftno-dendrokronologicheskiye issledovaniya: zadachi, metody, rezul'taty [Landscape-dendrochronological research: tasks, methods, results] // Landscape science: theory, methods, regional studies, practice. Materials of the XI International Landscape Conference / Executive editor K.N. Diakonov. Moscow: Geographical Dep., 2006. P. 97–98. (In Russian)

Dyakonov K.N., Bochkarev Yu.N. Geofizicheskiye faktory dinamiki radial'nogo prirosta derev'yev v landshaftakh Zapadno-Sibirskoy ravniny i Priel'brus'ya [Geophysical factors influencing the diameter increment of trees in the landscapes of the West-Siberian Plain and the Elbrus region] // Vestnik Moskovskogo un-ta. Seria 5. Geografia. 2010. № 4. P. 3–9. (In Russian)

Hantemirov R.M. Dinamika drevesnoy rastitel'nosti i izmeneniya klimata na severe Zapadnoy Sibiri v golotsene [Trends in woody vegetation and climate change in the north of Western Siberia in the Holocene]. Dissertation abstract for the

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Head of the Department, Professor, D.Sc. in Geography, Corresponding Member of the RAS; *e-mail:* diakonov.geofak@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Engineer, Ph.D. in Geography; Earth Cryosphere Institute, Tyumen Science Center SB RAS; *e-mail:* uboch@yandex.ru

degree of Doctor of Biological Sciences. Ekaterinburg, 2009. 42 p. (In Russian)

Kozin V.V. Parageneticheskiy analiz rechnykh dolin [Paragenetic analysis of river valleys]. Tyumen: Tyumen State University press, 1979. 88 p. (In Russian)

Konishchev V.N. Reaktsiya vechnoy merzloty na potepleniye klimata [Response of permafrost to the climate warming] // Vestnik Moskovskogo un-ta. Seria 5, Geografia. 2009. № 4. P. 10–20. (In Russian)

Kompleksnyy monitoring severotayezhnykh geosistem Zapadnoy Sibiri [Comprehensive monitoring of the northern taiga geosystems of Western Siberia] / Executive editor V.P. Melnikov. Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Earth's Cryosphere. Novosibirsk: Academic press «Geo», 2012. 207 p. (In Russian)

Melnikov E.S., Vasiliev A.A., Leibman M.O., Moskalenko N.G. Dinamika sezonnotalogo sloya v Zapadnoy Sibiri [Dynamics of seasonal thawing in Western Siberia] // Earth's Cryosphere. 2005. Vol. IX, № 2. P. 23–32. (In Russian)

Milkov F.N. Parageneticheskiye landshaftnyye komplekсы [Paragenetic landscape complexes] // Nauchnyye zapiski of Voronezh branch of the Geographical society of USSR. 1966. P. 3–9. (In Russian)

Nelson F., Shiklomanov N., Hinkel K., Brown J. Decadal Results from the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program // Proc. Of the Ninth Intern. Conf. On Permafrost (Ed. By D.L. Kane, K.V. Hinkel). USA, Univ. Of Alaska, 2008. P. 1273–1280.

Nikolaev A.N. Drevsno-kol'tsevyye khronologii kak otrazheniye izmeneniy klimata [Tree ring chronologies as a response to climate change] // Forest and permafrost: Peculiarities of composition and structure of forests in the permafrost region, problems of sustainable management and protection. Yakutsk: Yakutsk university press, 2005. P. 25–33. (In Russian)

Reteyum A.Yu. Fiziko-geograficheskoye rayonirovaniye i vydeleniye geosistem [Physical-geographical regionalization and geosystems allocation] // Problems of Geography. Vol. 98:

Quantitative methods in studying natural environment. Moscow: Mysl, 1975. P. 5–28. (In Russian)

Tishkov A.A., Krenke-Jr A.N. «Pozeleneniye» Arktiki v XXI veke kak effekt sinergizma deystviya global'nogo potepleniya i khozyaystvennogo osvoyeniya [«Greening» of the Arctic in the twenty-first century as a synergy effect of global warming and economic development] // Arctic: ecology and economy. 2015. № 4(20). P. 28–37. (In Russian)

Tumel N.V., Zotova L.I. Geoekologiya kriolitozony [Geoecology of the cryosphere]. Tutorial. 2nd edition. Moscow: Urait Publishing House. 2017. 220 p. (In Russian)

Turmanina V.I. Puti vosstanovleniya prirodnykh usloviy poslednego tysyacheletiya i osnovnyye rezul'taty [Ways to restore the natural conditions of the last millennium and the main results] // Rhythms of glacial processes. M.: Moscow University Press, 1979. P. 24–55. (In Russian)

Shpolyanskaya N.A. Vechnaya merzlota i global'nyye izmeneniya klimata [Permafrost and Global Climate Change]. M.-Izhevsk. Institute of Computer Science, 2010. 198 p. (In Russian)

Ulrich M., Matthes H., Iijima Y., Schirrmeyer L., Fedorov A. N., Schutze J. Quantifying thermokarst and alpine lake changes and influencing factors during the last 70 years in Central Yakutia // XI International Conf. on Permafrost. Book of Abstracts, 20–24 June 2016. Potsdam. Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein. P. 916–917.

Vaganov E.A., Shiyatov S.G. Dendroklimaticheskiye i dendroekologicheskiye issledovaniya v severnoy Yevrazii [Dendroclimatic and dendroecological Studies in Northern Eurasia] // Russian Journal of Forest Science. 2005. № 4. P. 18–27. (In Russian)

Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.K., Budanova N.A. Golotsenovaya dinamika bugrov pucheniya bliz yuzhnoy granitsy ikh areala kak reaktsiya na ekstremal'nyye lokal'nyye i global'nyye izmeneniya [Dynamics of frost mounds near the southern border of their range in Holocene as the response to extreme local and global changes] // Extreme Cryogenic Phenomena: Basic and Applied Aspects. Proc. Intern. Conf., ONTI, Pushchino, 2002. P. 135–136. (In Russian)

Received 28.03.2019

Revised 08.04.2019

Accepted 15.04.2019