

## ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

### Экология

УДК [561:551.583:551.791] (571.56)  
DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-4-6

### Реконструкция климатических градиентов позднего плейстоцена Якутии на основе палеоботанических данных

А.В. Протопопов<sup>1,\*</sup>, Е.И. Троева<sup>2</sup>, В.В. Протопопова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Академия наук РС(Я), Якутск, Россия

<sup>2</sup>Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия

\*a.protopopov@mail.ru

**Аннотация.** Авторами предложена оригинальная методика реконструкции палеоклиматических параметров на основе изучения особенностей современного пространственного распространения отдельных видов растений и их связи с климатическими градиентами. В ходе исследований были построены климатограммы по средним температурам января и июля, а также по среднегодовому количеству осадков, соответствующие современным ареалам анализируемых видов растений. Для реконструкции палеоклиматов задействованы виды растений, отсутствующие в современной флоре рассмотренных регионов. Для реконструкции климата позднего плейстоцена Якутии проводится построение климатограмм, при помощи пространственного анализа с использованием ГИС-пакета ArcGIS 10.1 (ESRI, Inc.) с подключением модуля Spatial Analyst. Пространственный анализ основывался на определении амплитуд климатических показателей для каждого вида путем экстракции данных из климатических растров шаблоном современных ареалов, полученных из анализа литературы и флористических баз данных. Получены данные, что среднегодовые температуры июля в каргинский термохрон на севере Якутии были почти на 8 °С выше современных. Значительно выше по сравнению с современными сумма годовых осадков.

**Ключевые слова:** Якутия, поздний плейстоцен, палеофлора, реконструкция палеоклимата, градиент, климатограмма, термохрон, криохрон, каргинское межледниковье.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-45-140007 p\_a и проекта VI.52.2. «Фундаментальные и прикладные аспекты изучения разнообразия растительного мира Северной и Центральной Якутии» (№ 0376-2019-0003).

#### Введение

Четвертичный период характеризуется многократным чередованием холодных и теплых периодов. Причин таких колебаний климата достаточно много, включая космические, такие как количество солнечных пятен или периоды колебания отношения расстояния от Солнца до Земли к длине главной оси земной орбиты до вулканической активности и выработки метана [1].

Сейчас в тренде парадигма глобального потепления климата, подтверждающаяся наблюдениями за состоянием паковых льдов Арктики, ледового панциря Антарктиды, альпийских ледников.

Но глобальные изменения в климате Земли могут иметь свои региональные особенности, обусловленные комплексом причин – от рельефа до изменения направления движения воздушных масс или теплопереноса морских течений. Изменения климата представляют собой не только масштабную природную опасность в виде наводнений, активизации термокарстовых процессов, вспышек эпизоотий, но могут оказать сильнейшее влияние на многие отрасли хозяйственной деятельности. Поэтому так важен прогноз будущих трендов климатических изменений, что невозможно без объективного изучения климатических характеристик прошлого.

### Материалы и методы

Для реконструкции палеоклиматов были задействованы виды растений, отсутствующие в современной флоре рассмотренных регионов [2]. В основу метода положен подход, предложенный В.П. Гричук [3], базирующийся на существовании тесных связей растений с климатическими условиями на территории их произрастания. При этом принимается, что эти связи остаются неизменными на всем протяжении существования данного вида. Этот подход положен в основу многих современных палеоклиматических исследований [4].

Для реконструкции климата позднего плейстоцена Якутии проводится построение климатограмм, при помощи пространственного анализа с использованием ГИС-пакета ArgGIS 10.1 (ESRI, Inc.) с подключением модуля Spatial Analyst. Здесь необходимо подчеркнуть, что в основу аналитических исследований положены полевые материалы, собранные авторами в течение многих лет на территории Якутии. Также использованы литературные данные о позднеплейстоценовой растительности сопредельных с Якутией регионов [5]. Методологический подход в построении климатограмм является оригинальным, так как обычно в реконструкциях палеоклиматов с использованием древней растительности на принципах актуализма применяются не отдельные виды растений, а флористические и/или спорово-пыльцевые спектры [5, 6].

Определение значений климатических показателей, при которых возможно существование каждого из анализируемых таксонов ископаемой

флоры, производится с построением климатограмм. Совмещение графиков позволяет выяснить общее климатическое поле, которое и характеризует климат изучаемого исторического периода.

Проводился пространственный анализ, включающий в себя определение амплитуд климатических показателей для каждого вида путем экстракции данных из климатических растров шаблоном современных ареалов, полученных из анализа литературы и флористических баз данных [7–11]. Современный ареал вида, полученный на основе литературных данных [12], являлся шаблоном для экстракции климатических значений. В полученных выборках отсекали крайние значения с тем, чтобы амплитуды климатических показателей были статистически значимы.

### Результаты и обсуждение

Список видов растений, включенных в построение климатограмм, был составлен с учетом того, что в настоящее время они отсутствуют на тех территориях, в которых произрастали в позднем плейстоцене. Так в арктической зоне отсутствуют – *Abies sibirica* Ledeb., *Alnus hirsuta* (Spach) Turcz. ex Rupr., *Betula pendula* Roth, *Nuphar pumila* (Timm.) DC., в арктической зоне и в яно-индигирском флористическом районе – *Picea obovata* Ledeb., *Pinus sylvestris* L., *Pinus sibirica* Du Tour., в Якутии не произрастают – *Persicaria foliosa* (Lindb. fil.) Kitag., *Ranunculus acris* L., *Ulmus pumila* L.

В табл. 1 показаны амплитуды температур и осадков, характерных для регионов произрастания указанных выше видов.

Таблица 1

Амплитуды среднегодовых температур января, июля и годовых сумм осадков

Table 1

Amplitudes of average annual temperatures in January, July and annual precipitation totals

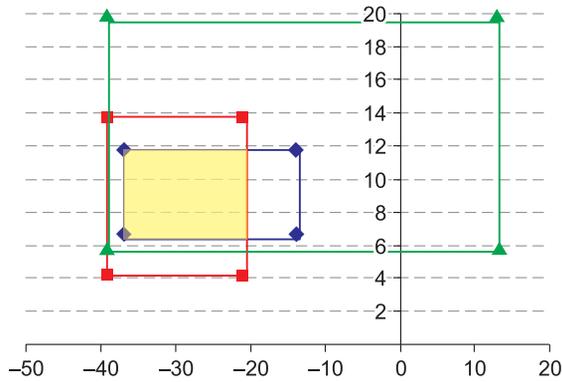
Вид	$t_{\text{январь}}^{\circ\text{C}}$	$t_{\text{июль}}^{\circ\text{C}}$	$\Sigma_{\text{год}}^{\text{мм}}$
<i>Abies sibirica</i> Ledeb.	–36,8...–13,9	6,7–18,5	231–1062
<i>Alnus hirsuta</i> (Spach) Turcz. ex Rupr.	–39,1...–21,2	13,8–18,0	309–544
<i>Betula pendula</i> Roth.	–49,5...6,9	13,6–20,8	201–826
<i>Nuphar pumila</i> L.	–23,9...5,2	5,4–22,8	293–2772
<i>Persicaria foliosa</i> (Lindb. fil.) Kitag.	–17,6...–4,7	10,9–18,2	487–700
<i>Picea obovata</i> Ledeb.	–39,2...12,9	5,9–25,8	150–1202
<i>Pinus sibirica</i> Du Tour.	–36,6...–15,2	13,1–19,1	317–626
<i>Pinus sylvestris</i> L.	–43,6...2,0	13,3–21,7	234–760
<i>Ranunculus acris</i> L.	–19,0...6,3	7,6–21,8	482–1399
<i>Ulmus pumila</i> L.	–27,9...6,2	15,3–27,1	308–1099

РЕКОНСТРУКЦИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТОВ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА ЯКУТИИ

Климатограммы для каждого флористического центра/периода строились по осям средних температур января (ось абсцисс) и июля (ось ординат) (рис. 1). За крайние значения температур принимались значения амплитуд для видов растений (см. табл. 1). Желтым выделены клима-

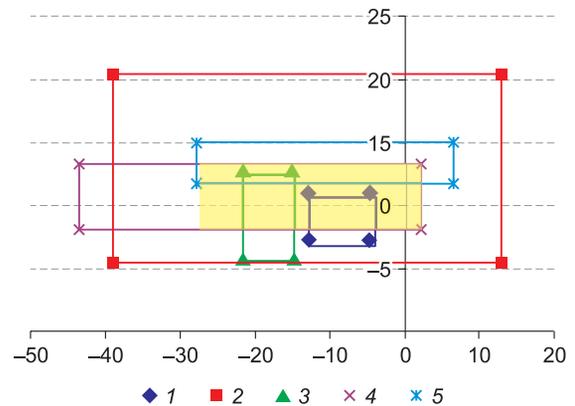
тические поля, которые должны характеризовать температурные условия конкретного исторического периода.

Поскольку ель характеризуется наибольшими температурными диапазонами в данной группе, климатическое поле ограничивается климато-



**Рис. 1.** Климатограмма видов для арктической зоны каргинского интерстадиала. Зеленый – *Picea obovata*, красный – *Alnus hirsuta*, синий – *Abies sibirica*.

**Fig. 1.** Climate profile of species for the Arctic zone of the Kargin interglacial. Green – *Picea obovata*, red – *Alnus hirsuta*, blue – *Abies sibirica*.

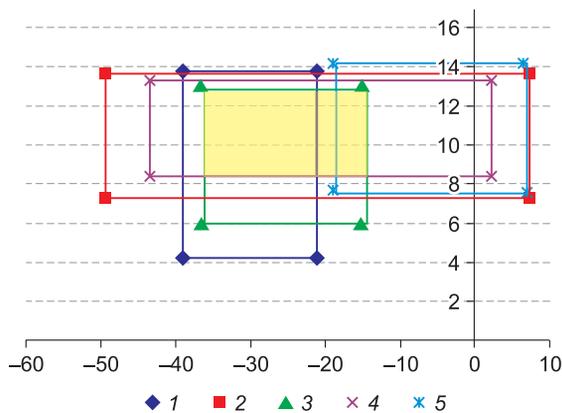


**Рис. 2.** Климатограмма бассейна Индигирки в каргинское межледниковье.

1 – *Persicaria foliosa*, 2 – *Picea obovata*, 3 – *Pinus sibirica*, 4 – *Pinus sylvestris*, 5 – *Ulmus pumila*.

**Fig. 2.** Climate profile of the Indigirka basin in the Kargin interglacial.

1 – *Persicaria foliosa*, 2 – *Picea obovata*, 3 – *Pinus sibirica*, 4 – *Pinus sylvestris*, 5 – *Ulmus pumila*.

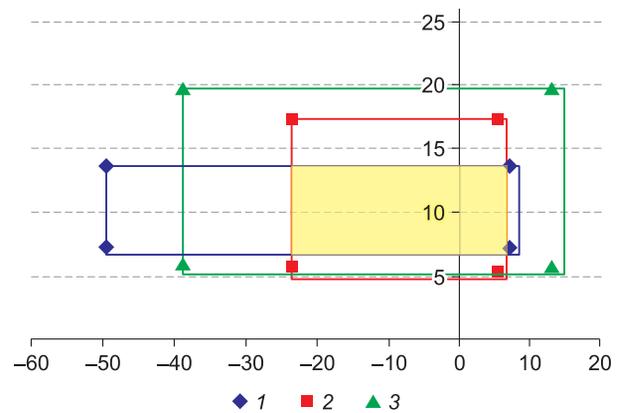


**Рис. 3.** Климатограмма видов для бассейна Колымы в каргинское межледниковье.

1 – *Alnus hirsuta*, 2 – *Betula pendula*, 3 – *Pinus sibirica*, 4 – *Pinus sylvestris*, 5 – *Ranunculus acris*.

**Fig. 3.** Climate profile of species for the Kolyma basin in the Kargin interglacial.

1 – *Alnus hirsuta*, 2 – *Betula pendula*, 3 – *Pinus sibirica*, 4 – *Pinus sylvestris*, 5 – *Ranunculus acris*.



**Рис. 4.** Климатограмма видов для арктической зоны сарганского криохрона.

1 – *Betula pendula*, 2 – *Nuphar pumila*, 3 – *Picea obovata*

**Fig. 4.** Climatogram of species for the Arctic zone of the Sartan cryochron.

1 – *Betula pendula*, 2 – *Nuphar pumila*, 3 – *Picea obovata*.

Таблица 2

Сравнение диапазонов климатических полей с современными температурами [14]

Table 2

Comparison of ranges of climatic fields with modern temperatures [14]

Период, флористический район	$t_{\text{январь}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{июль}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{январь}}, ^\circ\text{C}$ (совр.)	$t_{\text{июль}}, ^\circ\text{C}$ (совр.)
Каргинский, арктическая зона	-36,8...-21,2	6,7-11,8	-36,0...-32,0	6,0-10,0
Каргинский, бассейн Индигирки	-27,9... 2,0	8,4-15,3	-38,0... -32,0 (до-48 и ниже в горах)	10,0-14,0
Каргинский, бассейн Колымы	-36,6... -15,2	8,4-13,1	-36,0... -32,0	10-14
Сартанский, арктическая зона	-23,9... 5,2	7,2-13,6	-36,0...-32,0	6,0-10,0
Каргинский, арктическая зона	-36,8... -13,9	13,3-18,5	-36,0...-32,0	6,0-10,0

Таблица 3

Сравнение диапазонов значений годовых сумм осадков с современными данными [14]

Table 3

Comparison of ranges of annual precipitation with current data [14]

Период/ флористический район	$\Sigma_{\text{год}}, \text{мм}$	$\Sigma_{\text{год}}, \text{мм}$ (совр.)
Каргинский, арктическая зона	309-544	150-250
Каргинский, бассейн Индигирки	487-626	300-400
Каргинский, бассейн Колымы	482-544	250-350
Сартанский, арктическая зона	213-826	150-250

граммами ольхи и пихты. Достаточно сложна для интерпретации климатограмма бассейна Индигирки в каргинское межледниковье (рис. 2). Климатические диапазоны сосны сибирской и горца не совпадают. Тем не менее, они оба налагаются на диапазоны остальных видов. Поэтому предлагаем судить о климатическом поле по климатограммам сосны обыкновенной и вяза приземистого. Здесь также не пересекаются диапазоны ольхи и лютика (рис. 3), поэтому климатическое поле составлено по диапазонам обоих видов сосен, которые попадают в диапазоны других видов. Климатическое поле Арктического Колымского флористического района (фр)

Сартанского криохрона ограничено диапазонами кубышки малой и березы (рис. 4).

В табл. 2 представлено числовое описание климатических полей. Диапазоны зимних температур сомнительны, по крайней мере, их крайние высокие значения. Это объясняется тем, что ареалы отдельных видов растений пролегают в более теплых широтах, поэтому разумнее рассматривать значения зимних температур по северным границам ареалов. Однако, согласно данным по восстановленным палеоклиматам [4], зимние температуры последнего межледниковья плейстоцена были выше современных на 10-12° в арктической зоне и на 8-10° в бассейнах Индигирки и Колымы, т. е. составляли порядка -22...-26 °С, что попадает в отмеченные диапазоны. Тем не менее, полученные нами данные требуют уточнения. Это же касается и температурных диапазонов сартанского криохрона, как и отмечалось выше. Согласно данным [13] средние температуры января в этот период на большей части Сибирской криолитозоны были ниже современных на 10-12°.

Гораздо более информативны летние температуры, которые отражают широтные изменения в пределах каргинского межледниковья, повышаясь к югу. Согласно литературным данным [4], июльские температуры каргинского межледниковья на территории Якутии были выше на 3 °С. Наши данные показывают повышение на 1 °С, а в бассейне Колымы даже небольшое понижение.

Диапазон годовых осадков дан по совмещению амплитуд данного параметра для каждого региона и геологического периода (табл. 3). Как и

в случае с январскими температурами, крайние высокие значения определяются ареалами видов, пролегающими в южных и менее континентальных широтах. Поэтому следует рассматривать показатели для северных границ ареалов. В нашем случае – крайние низкие значения. Согласно полученным нами результатам, наиболее влажный исторический период – каргинский интерстадиал. Это подтверждается и литературными данными [4, 15], которые говорят, что в этот период уровень осадков превышал современные показатели на 100 мм. В последнее оледенение плейстоцена климат был более засушливым.

### Выводы

По результатам наших исследований показано, что среднегодовые температуры июля в Северной Якутии были почти на 8 °С выше современных и почти на 2 °С выше реконструированных из литературных источников. Сумма годовых осадков по нашим данным также выше и современных, и ранее реконструированных показателей. Полученные данные являются существенным вкладом в изучение динамики климата и растительного покрова Северного полушария в позднем плейстоцене.

Проанализированные виды растений позволили наиболее полно и точно дать климатическую характеристику каргинскому интерстадиалу позднего плейстоцена. Наименее надежными выглядят полученные данные по последнему сартанскому криохрону плейстоцена. Проблема заключается в недостаточном количестве таксонов, доступных для анализа.

### Литература

1. *Украинцева В.В., Украинцев В.Б.* Климат Земли. В прошлом, настоящем и будущем. СПб.: Астерион, 2019. 155 с.

2. *Протопопов А.В.* Динамика наземных экосистем Якутии в позднем плейстоцене и голоцене. Якутск: Алаас, 2017. 412 с.

3. *Гричук В.П.* Опыт реконструкции некоторых элементов климата Северного полушария в атлантический период голоцена // Голоцен. М.: Наука, 1969. С. 41–57.

4. *Палеоклиматы и палеоландшафты* внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен–голоцен: Атлас-монография / Под ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС, 2009. 120 с.

5. *Украинцева В.В.* Цветковые растения – надежные индикаторы и биомониторы состояния окружающей среды // Биотестирование в решении экологических проблем. СПб., 1991. С. 87–96.

6. *Kienast F., Siebert C., Dereviagin A., Mai D.* Climatic implications of Late Quaternary plant macrofossil assemblages from the Taimyr Peninsula, Siberia // *Global and Planetary Change*. 2001. V. 31. P. 265–281.

7. *Caudullo G., Welk E., San-Miguel-Ayanz J.* Chorological maps for the main European woody species. 2017. Data in Brief 12, 662-666. DOI: 10.1016/j.dib.2017.05.007

8. *Historical collections of the Swedish Museum of Natural History* [Электронный ресурс]: карта распространения *Persicaria foliosa*. URL: <http://linnaeus.nrm.se/flora/di/polygona/persi/persfoln.jpg>

9. *Natural Earth map dataset* [Электронный ресурс]: URL: <http://www.naturalearthdata.com/>

10. *Worldclim* – Global Climate Data. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.worldclim.org/>

11. *Flora of North America*. [Электронный ресурс]: URL: <http://floranorthamerica.org/>

12. *Флора Сибири*: в 14 т. Новосибирск: Наука, 1987–2003.

13. *Васильчук Ю.К., Котляков В.М.* Основы изотопной геоэкологии и гляциологии: Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 616 с.

14. *Атлас сельского хозяйства ЯАССР*. Якутск: ГУГК, 1989. 116 с.

15. *Украинцева В.В.* Растительность и климат Сибири эпохи мамонта / ред. В.Н. Ловелиус, Ю.М. Карбаинов; Красноярск: Восточно-Сибирский филиал Международного института леса, 2002. 192 с.

Поступила в редакцию 28.08.2019

Принята к публикации 25.10.2019

### Об авторах

ПРОТОПОПОВ Альберт Васильевич, доктор биологических наук, заведующий отделом, Академия наук Республики Саха (Якутия), 677007, Якутск, пр. Ленина, 33, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-6543-4596>, [a.protopopov@mail.ru](mailto:a.protopopov@mail.ru);

ТРОЕВА Елена Ивановна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-8016-830X>, [troeva.e@gmail.com](mailto:troeva.e@gmail.com);

ПРОТОПОПОВА Виктория Валерьевна, инженер-исследователь, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-8612-5960>, [protopopova.vic@yandex.ru](mailto:protopopova.vic@yandex.ru).

*Информация для цитирования*

Протопопов А.В., Троева Е.И., Протопопова В.В. Реконструкция климатических градиентов позднего плейстоцена Якутии на основе палеоботанических данных // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019, Т. 24, № 4. С. 79–85. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-4-6>

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-4-6

## Reconstruction of climatic gradients of the Late Pleistocene in Yakutia Based on paleobotanical data

A.V. Protopopov<sup>1,\*</sup>, E.I. Troeva<sup>2</sup>, V.V. Protopopova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Academy of Sciences of Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia

<sup>2</sup>Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia

\*[a.protopopov@mail.ru](mailto:a.protopopov@mail.ru)

**Abstract.** To reconstruct the Late Pleistocene climate at the territory of modern Yakutia, the authors propose an approach based on the existing distribution range of certain plant species as related to climatic gradients. The climatograms were built, showing species distribution within the optimal ranges of average July and January temperatures, as well as annual precipitation amounts. The analyzed species are absent in the modern flora of the studied floristic regions. The climatograms were built based on the spatial analysis using ArcGIS 10.1 package (ESRI, Inc.). For that, the statistically significant value range of climatic variables was determined for each species by their extraction from climatic raster data based on the GIS-layers of plant distribution areas. Plant distribution ranges were determined from the published data and floristic databases. The analysis showed the average July temperature of the Kargin Interstadial in northern Yakutia to be nearly 8 °C higher as compared to modern characteristics of this variable. The annual amount of precipitation for that period was also greater than the modern one.

**Key words:** Yakutia, Late Pleistocene, paleoflora, paleoclimate reconstruction, gradient, climatogram, thermochrone, cryochrone, Kargin Interstadial.

**Acknowledgements.** The study was carried out with support of RFBR (grant 18-45-140007 p\_a) and project VI.52.2 Fundamental and applied aspects of studying the diversity of flora of the Northern and Central Yakutia (№ 0376-2019-0003).

### References

1. Ukraineva V.V., Ukrainev V.B. *Klimat Zemli. V proshlom, nastoyashchem i budushchem.* SPb: Asterion, 2019. 155 p.
2. Protopopov A.V. *Dinamika nazemnyh ekosistem Yakutii v pozdnem plejstocene i golocene.* Yakutsk: Alaas, 2017. 412 p.
3. Grichuk V.P. *Opyt rekonstrukcii nekotoryh elementov klimata severnogo polushariya v atlanticheskij period Golocena.* Golocen. M.: Nauka, 1969. P. 41–57.
4. *Paleoklimaty i paleolandshafty vnetropicheskogo prostranstva Severnogo polushariya. Pozdnij plejstocen – golocen: Atlas-monografiya / Pod red. A.A. Velichko.* M.: GEOS, 2009. 120 p.
5. Ukraineva V.V. *Cvetkovye rasteniya – nadezhnye indikatory i biomonitory sostoyaniya okruzhayushchej sredy // Biotestirovanie v reshenii ekologicheskikh problem.* SPb., 1991. P. 87–96.
6. Kienast F., Siegert C., Dereviagin A., Mai D. *Climatic implications of Late Quaternary plant macrofossil assemblages from the Taimyr Peninsula, Siberia // Global and Planetary Change.* 2001. V. 31. P. 265–281.
7. Caudullo G., Welk E., San-Miguel-Ayanz J. *Chorological maps for the main European woody species.*

## РЕКОНСТРУКЦИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ГРАДИЕНТОВ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА ЯКУТИИ

2017. Data in Brief 12, 662-666. DOI: 10.1016/j.dib.2017.05.007

8. *Historical* collections of the Swedish Museum of Natural History [Электронный ресурс]: карта распространения *Persicaria foliosa*. URL: <http://linnaeus.nrm.se/flora/di/polygona/persi/persfoln.jpg>

9. *Natural Earth* map dataset [Электронный ресурс]: URL: <http://www.natureearthdata.com/>

10. *Worldclim* – Global Climate Data. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.worldclim.org/>

11. *Flora* of North America. [Электронный ресурс]: URL: <http://floranorthamerica.org/>

12. *Flora* Sibiri: v 14 t. Novosibirsk: Nauka, 1987–2003.

13. *Vasil'chuk Yu.K., Kotlyakov V.M.* Osnovy izotopnoj geokriologii i glyaciologii: Uchebnik. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2000. 616 p.

14. *Atlas sel'skogo hozyajstva* YaASSR. Yakutsk: GUGK, 1989. 116 p.

15. *Ukraineva V.V.* Rastitel'nost' i klimat Sibiri epohi mamonta /red. V.N. Lovelius, Yu.M. Karbainov; Krasnoyarsk: Vostochno-Sibirskij filial Mezhdunarodnogo instituta lesa, 2002. 192 p.

### *About the authors*

ПРОТОПОПОВ Ал'берт Васильевич, доктор биологических наук, заведующий кафедрой, Академия наук Республики Саха (Якутия), 33 Ленина пр., Якутск, 677007, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-6543-4596>, [a.protopopov@mail.ru](mailto:a.protopopov@mail.ru);

ТРОЕВА Елена Ивановна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 41 Ленина пр., Якутск, 677980, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-8016-830X>, [troeva.e@gmail.com](mailto:troeva.e@gmail.com);

ПРОТОПОПОВА Виктория Валерьевна, инженер-исследователь, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 41 Ленина пр., Якутск, 677980, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-8612-5960>, [protopopova.vic@yandex.ru](mailto:protopopova.vic@yandex.ru).

### *Citation*

*Protopopov A.V., Troeva E.I., Protopopova V.V.* Reconstruction of climatic gradients of the Late Pleistocene of Yakutia based on paleobotanical data // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2019, Vol. 24, N 4. P. 79–85. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-4-6>