

Климатические условия формирования степей и тундр высокогорных котловин Алтая*

К. В. Чистяков¹, М. И. Амосов¹, И. В. Волков¹, Ю. Н. Курочкин¹,
С. Н. Лесовая¹, М. В. Манакова¹, Н. А. Нехуженко¹, И. И. Стрелков¹,
Г. А. Тюсов^{1,2}, Г. Н. Шастина¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Ботанический институт им. В. Л. Комарова Российской академии наук,
Российская Федерация, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 2

Для цитирования: Чистяков, К. В., Амосов, М. И., Волков, И. В., Курочкин, Ю. Н., Лесовая, С. Н., Манакова, М. В., Нехуженко, Н. А., Стрелков, И. И., Тюсов, Г. А., Шастина, Г. Н. (2019). Климатические условия формирования степей и тундр высокогорных котловин Алтая. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (4), 612–627.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.407>

В работе сопоставлены данные о растительности и климате высокогорных котловин Алтая. Объектами исследования были выбраны Бертекская котловина (расположена на высотах от 2200 до 2400 м) и котловина озера Хиндиктиг-Холь (2300–2400 м). В основу исследования положены данные о растительности и микроклиматических различиях, полученные в ходе экспедиционных исследований 2018 г. Для характеристики климата использованы данные многолетних наблюдений на метеостанциях Бертек и Мугур-Аксы. Для котловин наиболее типична степная растительность. В районе Хиндиктиг-Холя наряду со степными существуют также и тундровые участки, в некоторых случаях — мозаика тундр и степей. В Бертекской котловине участие тундровых элементов флоры незначительно. Растительный покров котловин формируется в условиях непродолжительного вегетационного периода и испытывает на себе неблагоприятное воздействие низких летних температур (средняя температура июля в Бертеке +9,3 °С, в районе Хиндиктиг-Холя +10,8 °С, что намного ниже показателей, типичных для степной зоны на равнинах; по этому показателю котловины напоминают ландшафты тундровой зоны). Уровень климатического увлажнения недостаточен для сплошного развития тундровых сообществ (коэффициент увлажнения Высоцкого — Иванова равен 0,74 против 0,61 в Бертеке). Благодаря лучшему увлажнению в районе Хиндиктиг-Холя распространены не только степные, но и тундровые ценозы. Микроклиматические наблюдения на смежных участках с разной растительностью показали, что виды, слагающие тундры с *Betula rotundifolia*, обладают такими особенностями, которые сами создают благоприятные условия для существования ценоза. По сравнению со степными участками воздух над тундрами нагревается лучше, под их пологом в дневное время он также более прогревается. Кроме того, *Betula rotundifolia* задерживает снег, что способствует лучшему увлажнению почвы. Благодаря этим особенностям обеспечивается повышенная контрастность растительного покрова и наличие мелкоконтурных сочетаний тундр и степей.

Ключевые слова: Монгун-Тайга, Укок, метеостанция НОВО, климатограмма, коэффициент увлажнения, тундра, степь, *Betula rotundifolia*, *Dryas oxyodonta*, *Kobresia*, *Festuca*, *Helictotrichon*, *Poa*.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (грант № 18-05-00860 А).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2019

1. Введение

Одна из характерных особенностей Алтайских гор — наличие значительного количества горных котловин, днища которых приурочены к различным высотным уровням (Михайлов и др., 1992). Некоторые из них (Бертекская, Джулукульская, Хиндиктиг-хольская котловины) расположены выше верхней границы распространения древесной растительности, и таким образом их ландшафты следует рассматривать как высокогорные. Согласно существующим схемам ботанико-географического районирования (Огуреева, 1980; Куминова и др., 1985) и классификациям ландшафтов (Исаченко и Шляпников, 1989; Самойлова и др., 2003), эти территории характеризуются как «тундростепные». Для них типично территориальное сближение степных и тундровых ценозов, в ряде случаев — мозаика тундр и степей. Считается, что тундростепь являлась одной из доминирующих природных зон на территории всей Евразии во время максимума последнего оледенения (LGM), охватывая обширные районы северной части земного шара в течение 100 тыс. лет и исчезла около 12 тыс. лет назад (Pavelkova Ricanova et al., 2014).

Существенно, что и такой инертный компонент ландшафтов, как почвы, в высокогорных котловинах Алтая обладает рядом специфических черт, которые отличают их от более холодных и гумидных аналогов тундровой зоны севера Евразии. В почвенном плане наиболее изученной из высокогорных котловин является Джулукульская. Именно на примере Джулукульской котловины было выявлено, что криотурбированный горизонт значительно менее увлажнен, чем в почвах тундр севера Евразии. Кроме того, в криоземах Джулукульской котловины, сформированных под ерниково-злаковой тундрой с диффузным покровом лишайников и мхов на суглинистых отложениях, диагностируется хорошо выраженный дерновый горизонт, который не предполагается в почвах этого отдела (Полевой определитель почв России, 2008). На вершинах гравийно-песчаных гряд (мерзлота отсутствует) были описаны подбуры перегнойные иллювиально-гумусовые — типичные почвы для тундровой зоны. Особенностью подбуров Джулукульской котловины является то, что формируются они под лишайниково-злаковым разнотравьем с небольшим участием мха на поверхности, то есть под растительной ассоциацией, предполагающей формирование дернового горизонта, несвойственного для подбуров тундр севера Евразии (Лесовая и Горячкин, 2007). Дальнейшие почвенные исследования (Гопп, 2015) подтвердили феномен формирования в Джулукульской котловине типов почв с хорошо выраженным дерновым горизонтом.

До настоящего времени вопрос о факторах климатической обусловленности близкого расположения степных и тундровых участков остается недостаточно исследованным. Существующие публикации посвящены либо характеристике климата (Кривоносов, 1975; Харламова, 2004), либо описанию растительности (Куминова, 1960; Огуреева, 1980; Дьяченко, 2000; Макунина, 2018). В публикации (Chytry et al., 2018) выдвинута гипотеза, что тундростепи на высокогорных плато и в межгорных котловинах Алтая сформировались из-за уникального сочетания холодного и сухого климата, который схож с условиями холодных периодов плейстоцена.

Цель настоящей работы состоит в выявлении климатических факторов существования степных и тундровых растительных сообществ в пределах высокогорных котловин Алтая.

2. Объект исследования

Объектами исследования были выбраны Бертекская котловина и котловина озера Хиндиктиг-Холь (рис. 1), в которых представлена как степная, так и тундровая растительность (Самойлова и др., 2003). Работы проводились на двух полигонах, расположенных в пределах котловин на расстоянии около 210 км друг от друга. Ближайшие к ним среднегорные котловины — Курайская (1500–1600 м) и Чуйская (1750–1850 м) — заняты степной и полупустынной растительностью.



Рис. 1. Орографическая часть Южного Алтая

Бертекская котловина — крупнейшая из высокогорных котловин Алтая, расположена в южной части плоскогорья Уюк. Днище котловины имеет отметки от 2200 до 2400 м. Исследованный нами полигон расположен в пределах холмисто-моренной равнины с перепадами высот до 30 м (район ручья Музды-Булак и др.). Характерная особенность холмисто-моренной равнины — наличие многочисленных западных комплексов, нередко с бессточными озерами. В пределах полигона расположена часть пологонаклонной флювиогляциальной равнины, примыкающей к холмисто-моренной местности с востока (район ручья Кара-Чад).

Котловина озера Хиндиктиг-Холь расположена на высоте 2300–2400 м. Днище котловины почти полностью занято водоемом, поэтому исследованный нами полигон, примыкающий к озеру с северной стороны, охватывал не только саму котловину, но и прилегающие склоны невысокого горного обрамления. Для полигона характерны значительные уклоны, разнообразие экспозиционных и литологических условий.

2. Методы исследований и фактический материал

В основу исследования положены данные о растительности и климате, полученные в ходе экспедиционных исследований в период с 15 июня по 14 июля 2018 г.

Для описания природных комплексов закладывались пробные площади размером 5×5 м. В бланки описаний заносилась ландшафтная характеристика территории, список флоры и проективное покрытие, описание почвенного профиля. Всего было выполнено 78 описаний: 50 в районе оз. Хиндиктиг-Холь и 28 в Бертекской котловине. Для верификации полевых материалов собрано более 500 гербарных образцов растений, проведен отбор почвенных образцов.

Для характеристики климата котловин использованы данные метеостанций Бертек (в одноименной котловине в 4 км от полигона) и Мугур-Аксы (в 37 км от озера Хиндиктиг-Холь), а также на метеостанции Кош-Агач. Сведения о формировании снежного покрова почерпнуты из работы Н. Ф. Харламовой (Харламова, 2004).

Полевые исследования микроклимата в районе озера Хиндиктиг-Холь проводились по стандартным методикам микроклиматических наблюдений в течение 13 суток с 15 по 28 июня 2018 г. Комплекс наблюдений включал градиентные измерения температуры и влажности воздуха, измерение температуры почвы, скорости и направления ветра, а также количества осадков на двух станциях. Одна из них располагалась в пределах степного ценоза, другая — на участке с тундровой растительностью (с развитым ярусом из карликовой березы *Betula rotundifolia*). Расстояние между станциями составляло 320 м, оба участка можно считать однородными по экспозиции склона (запад-северо-запад) и по углу наклона поверхности (около 10°).

Дополнительно на степном участке определялось количество суммарной радиации с помощью пиранометра М-80; на обеих станциях была проведена альбедосъемка (использовался походный альбедометр). Все вышеперечисленные наблюдения проводились в стандартные метеорологические сроки за исключением ночных. Кроме того, на участке с тундровой растительностью производилась непрерывная регистрация температуры и относительной влажности воздуха на высоте 2 м под пологом карликовых берез (на высоте около 5–7 см над поверхностью почвы). Для этого использовался автоматический комплекс НОВО с дискретностью фиксации данных в 0,5 часа.

Вторая часть климатических полевых исследований проводилась в течение 11 дней на полигоне в Бертекской котловине. Измерения велись по сокращенной программе с использованием автоматической метеостанции НОВО, которая регистрировала температуру и относительную влажность воздуха с дискретностью 0,5 часа. Указанное сокращение программы исследований обусловлено непродолжительностью полевого периода, а также наличием значительного объема информации, полученного на метеостанции Бертек в период 1960–1981 гг.

Используя подходы А. Г. Исаченко (Исаченко, 1991) в качестве важных климатических показателей, влияющих на развитие растительности, мы рассматривали летние температуры и среднегодовые значения коэффициента увлажнения Высоцкого — Иванова, вычисляемого по формуле:

$$K = r/E_0, \quad (1)$$

где r — количество осадков, мм; E_0 — испаряемость, мм.

Расчеты данного коэффициента выполнялись в среднемесечном и среднедекадном вариантах с учетом формул для определения испаряемости, которые были предложены Н. Н. Ивановым (Иванов, 1948).

Для декады:

$$E_0 = 0,061 * (25 + T)^2 * (1 - 0,01 f), \quad (2)$$

где T — средняя декадная температура, °C; f — средняя декадная относительная влажность воздуха, %.

Для месяца:

$$E_0 = 0,0018 * (25 + T)^2 * (100 - f), \quad (3),$$

где T — средняя месячная температура, °C; f — средняя месячная относительная влажность воздуха, %.

Среднегодовые значения K определялись путем осреднения месячных показателей, вычисленных по формуле (3).

Для расчетов использовались данные метеостанций Бертек и Мугур-Аксы (расположена на высоте 1830 м). Расчет гидротермических показателей для района озера Хиндиктик-Холь производился с учетом вертикальных градиентов температуры и осадков, выявленных во время предыдущих исследований (Чистяков и др., 2012) и уточненных, исходя из экспедиционных материалов 2018 г. Кроме того, для определения значений относительной влажности в районе Бертекского полигона использовались данные метеостанции Кош-Агач (высота 1800 м). Они были пересчитаны, поскольку был взят во внимание вертикальный градиент, определенный с использованием данных, полученных на полигоне.

При оценке влияния климата на развитие растительности важно иметь в виду не только средние годовые показатели тепло- и влагообеспеченности, но и их внутригодовые изменения. В связи с этим нами были построены климатограммы Болла — Тейлора (рис. 2, 3), на которых в прямоугольной системе координат представлены траектории изменений сочетания среднемесечных температур и сумм осадков (по оси абсцисс показаны суммы осадков, по оси ординат — среднемесечные температуры).

Климатограммы Болла — Тейлора позволяют выделить период, благоприятный для вегетации растительности, а также провести помесечный анализ факторов, препятствующих фотосинтезу (Дажо, 1975; Асадулаев и др., 2013). Для этого климатограммы дополняют графическими изображениями термической «границы» вегетационного периода (+5 °C), а также линии, разделяющей засушливые и увлажненные условия. В последнем случае линия, выше которой на климатограмме располагается область с недостаточным увлажнением, проводилась по принципу: на каждый градус повышения температуры в среднем приходится 3 или 4 мм испаряющейся влаги. Конкретная пропорция рассчитывалась из соотношений, определенных формулой (3), при подставлении в которую средних месячных температур в диапазоне от +5 до +10 °C определялся рост значений испаряемости в расчете на градус; полученные величины уменьшались, исходя из того, что реальное испарение в степях меньше испаряемости в 1,7–2 раза (Иванов, 1960). В результате на климатограммах при проведении линии раздела засушливых и увлажненных условий были использованы соотношения температур и осадков 1:3 (Хиндиктик-Холь) и 1:4 (Бертек).

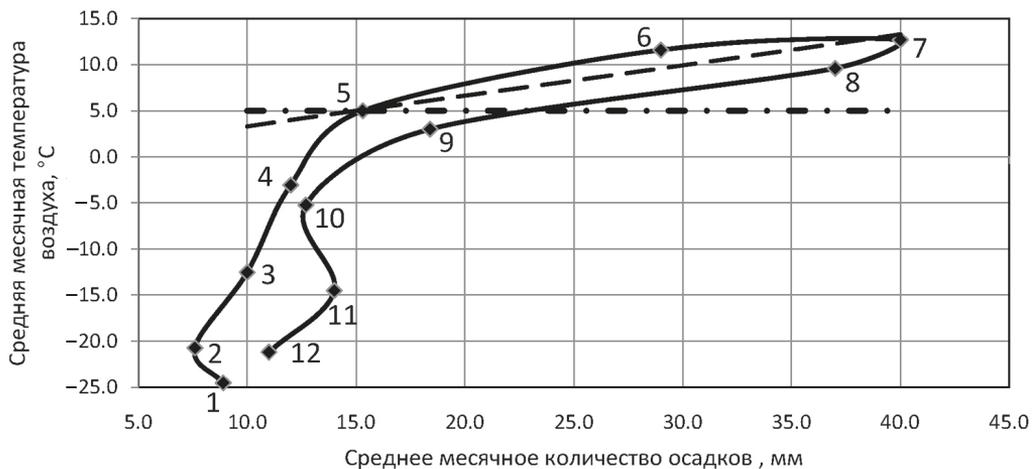


Рис. 2. Климатограмма годового хода гидротермических условий. Хиндиктиг-Холь, 1995–2017 гг. Сплошная линия — временной ход сочетанных значений температуры и осадков, прерывистая линия — граница между засушливыми и увлажненными условиями (выше — сухо, ниже — влажно). Прерывистая линия с точками — термическая граница вегетационного периода (более 5°C)

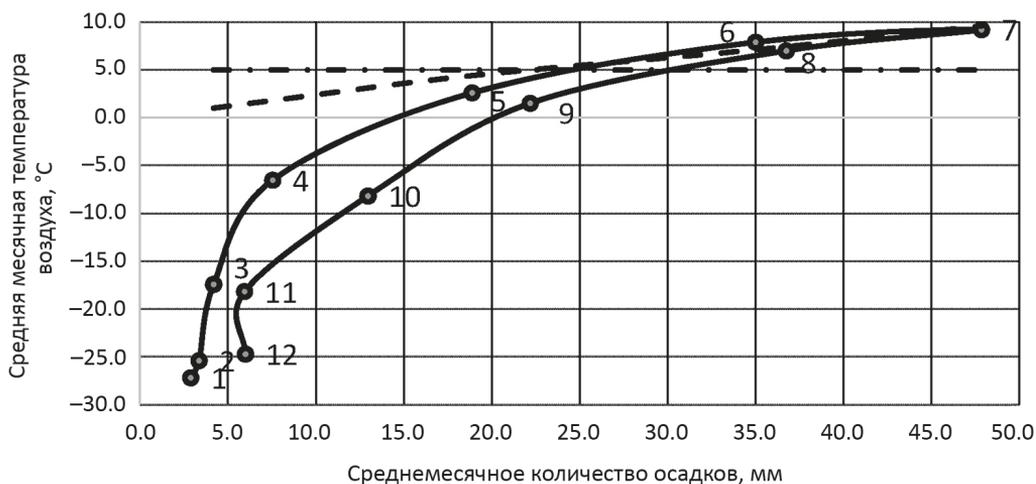


Рис. 3. Климатограмма годового хода гидротермических условий. Бертек, 1960–1981 гг. (условные обозначения см. рис. 2)

В качестве базы данных для построения климатограмм были использованы сведения метеостанций Бертек и Мугур-Аксы (в последнем случае проводился пересчет для района озера Хиндиктиг-Холь с учетом вертикальных градиентов).

4. Результаты

4.1. Характеристика растительности

Для котловины озера Хиндиктиг-Холь характерно сочетание сообществ криофитных степей, шпалернокустарничковых и кустарниковых (ерниковых) тундр.

Криофитные степи занимают хорошо дренированные склоны южных экспозиций с крутизной 10–25°. Доминантами являются *Poa attenuata*, *Helictotrichon hookeri*, *Festuca lenensis*. Часто встречаются *Artemisia frigida*, *Kobresia myosuroides*. На участках с уклонами до 10° видовое разнообразие возрастает за счет участия *Draba sibirica*, *Gentiana grandiflora*, *Trollius asiaticus*, *Pulsatilla ambigua*, *Bistorta vivipara*, *Vupleurum* spp., *Galium verum*, *Festuca ovina*, *Oxytropis* spp., *Potentilla* spp. Местами встречаются криофитные степи с участием кустарников *Spiraea media*, *Dasiphora fruticosa*, *Salix glauca*, а также со значительным участием *Kobresia myosuroides*.

Тундровые (ерниковые) ценозы наиболее часто встречаются на слабонаклонных (до 10°) склонах северных экспозиций с повышенным увлажнением. Для них характерен сомкнутый растительный покров. Кустарниковые тундры представлены ерниками с доминированием эндемика Алтае-Саянской горной области, южносибирско-северомонгольского высокогорного вида *Betula rotundifolia*. В ерниках с проективным покрытием (ПП) *Betula rotundifolia* не менее 80% повсеместно произрастает *Festuca altaica*, *Carex stenocarpa*, *Trisetum spicatum*, *Viola altaica*, *Silene hamarensis*. Под пологом *Betula rotundifolia* в таких сообществах преобладает опад березы (ПП до 70%) и зеленые мхи (ПП от 20 до 70%) в различных соотношениях. При снижении покрытия березы в ПП увеличивается разнообразие травянистых видов: *Kobresia myosuroides*, видов рода *Potentilla*, *Draba sibirica*, *Bistorta vivipara*, *Vupleurum longifolium*, *Thalictrum alpinum*, видов рода *Astragalus*, а также *Salix glauca*. Бобовые представлены *Hedysarum austrosibiricum*.

Шпалернокустарничковые тундры приурочены к выположенным вершинам и верхним частям склонов, зачастую сильно щебнистым. Эти ценозы диагностируются высокой долей участия в проективном покрытии кустарничка *Dryas oxyodonta*. Содоминантом таких сообществ зачастую является *Kobresia*, всегда произрастающая в них. Кустарничковые тундры имеют большее видовое разнообразие, чем ерниковые. В них произрастают *Trisetum spicatum*, *Helictotrichon hookeri*, *Papaver nudicaule*, *Saxifraga funstonii*, *Vaccinium vitis-idea*, виды родов *Pedicularis*, *Oxytropis*, *Saussurea*, стелющиеся виды ив. Напочвенный покров представлен лишайниками рода *Cladonia* с ПП от 20 до 35%.

Значительная роль в районе озера Хиндиктиг-Холь принадлежит различным вариантам сочетаний, описанных выше сообществ. Так на общем степном фоне могут быть распространены ерниковые куртины с *Betula rotundifolia*, приуроченные к понижениям глубиной в несколько десятков сантиметров. Для ерников характерны *Dryas oxyodonta*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Empetrum androgynum*, *Saxifraga funstonii*. Прилегающие участки заняты криофитной степной растительностью с обилием злаков и разнотравья (виды родов *Poa*, *Festuca*, *Pulsatilla*, *Potentilla*, *Silene*, *Oxytropis*), *Artemisia*, *Kobresia*, *Orostachys* и *Ephedra*.

Также нами описаны сообщества с доминированием дерновинных злаков (*Festuca*, *Poa*) и участием кустарничков (*Dryas*, *Vaccinium*). В таких сообществах по-

всеместно встречается *Kobresia myosuroides* и несколько видов рода *Carex*, зачастую примешиваются виды лугового разнотравья. Напочвенный покров составляют зеленые мхи (от 5 до 40 %), встречаются кустистые лишайники (до 10 %). Такое смешение видов не позволяет однозначно отнести описанные сообщества ни к тундровым, ни к степным.

В Бертекской котловине на холмисто-западной моренной равнине в элювиальных и трансэлювиальных местоположениях преобладают степные ценозы с доминированием *Festuca kryloviana*, *Poa attenuata*, *Ptilagrostis mongolica*. Доля разнотравья намного меньше. Встречаются различные виды родов *Potentilla*, *Astragalus*, *Aster*, *Allium* и *Artemisia macrantha*.

В небольших понижениях встречаются участки с переувлажненными кобрезиевыми лугами (*Kobresia smirnovii*).

В пределах более крупных озерных западин преобладает степная растительность. Однако крутые (до 10–12°) склоны северной экспозиции нередко покрыты разнотравно-ерниковыми сообществами. В них преобладает *Betula rotundifolia*, *B. fruticosa*, встречаются различные виды ив (*Salix glauca*, *S. pentandrata*, *S. microstachya*, *S. vestita*), *Dasiphora fruticosa*. Разнотравье представлено разными видами кобрезий и осок, *Pedicularis* sp., *Eritrichium villosum*, *Papaver croseum*. В напочвенном покрове зеленые мхи с ПП до 40 %. Отдельно стоит обратить внимание на наличие в данных сообществах как арктоальпийских (*Dryas oxyodonta*, *Salix reticulata*, *S. polaris*), так и бореальных (*Geranium albiflorum*, *Pyrola minor*, *Salix pentandrata*, *Betula microphylla*) видов.

Пологоволнистая флювиогляциальная равнина, представленная в Бертекской котловине, занята дерновинно-степной растительностью с абсолютным доминированием *Poa attenuata* и *Festuca krylovii*. На хорошо дренированных участках произрастают: *Artemisia depauperata*, виды *Saussurea*, *Ephedra equisetina*, *Orostachys spinosa*. В понижениях встречаются виды родов *Kobresia* и *Carex*.

В целом в растительном покрове Бертекской котловины преобладают криофитные дерновиннозлаковые степи лишь с незначительным участием арктоальпийских, а также бореальных видов. Последнее обстоятельство отличает ее от растительного покрова Хиндиктиг-хольской котловины, где наряду со степными ценозами значительную роль играют тундровые сообщества. Таким образом, растительность Бертекской котловины отличается несколько более ксерофитным обликом.

4.2. Климат

Высокогорья Алтая характеризуются умеренным резко континентальным климатом с суровой зимой и холодным летом. В зимний период преобладают антициклонические условия, что обуславливает малые величины снегонакопления. По данным Н. Ф. Харламовой, в Бертекской котловине среднемноголетние значения высоты снежного покрова равны 15 см (Харламова, 2004). Запасы воды в снежном покрове к концу февраля — первой половине марта составляют от 24–28 до 34–40 мм. Число дней с устойчивым снежным покровом — 176, его разрушение происходит в середине апреля, однако временный снежный покров высотой в 2–3 см может образовываться даже в мае, а снегопады возможны и в летние месяцы.

Метеоданные, полученные нами в ходе экспедиции 2018 г., позволили определить средние значения суточных температур и коэффициента увлажнения за время полевых наблюдений (табл. 1).

Таблица 1. Средние значения суточных температур ($T_{сут}$) и коэффициента увлажнения Высоцкого – Иванова (К), 2018 г.

Полигон	Период наблюдений	$T_{сут}$, °С	К
Бертек	3–7 июля	10,1	0,45
Хиндиктиг-Холь	15–26 июня	10,4	0,69

Результаты вычисления основных гидротермических показателей, основанные на данных метеостанций Бертек (1960–1981 гг.) и Мугур-Аксы (1965–2018 гг.), представлены в табл. 2 и на рис. 2, 3.

Таблица 2. Среднегодовые ($T_{год}$), среднелетние (за июнь — август) температуры ($T_{л}$), средняя температура июля ($T_{и}$), среднее годовое количество осадков (r), среднегодовые значения коэффициента увлажнения Высоцкого — Иванова (К), 1960–1981 гг.

Полигон	$T_{год}$, °С	$T_{л}$, °С	$T_{и}$, °С	r , мм	К
Бертек	-7,1	8,0	9,3	203	0,61*
Хиндиктиг-Холь	-5,6	9,6	10,8	179	0,74**

Примечания: * Показатель рассчитан с учетом данных метеостанции Кош-Агач по относительной влажности и соответствующих месячных вертикальных градиентов.

** Показатель рассчитан по данным метеостанции Мугур-Аксы с использованием средних месячных вертикальных градиентов температуры, осадков и относительной влажности.

Таблица 3. Горизонтальные градиенты температуры воздуха между тундровым и степным участками в районе Хиндиктиг-Холя, °С/100 м

Градиент	Уровень 0,5 м	Уровень 2,0 м	Время
Средний за период наблюдений	-0,44	-0,41	–
Максимальный	-2,00	-1,34	13.00
Обратный максимальный	0,41	0,37	07.00

В некоторых случаях на уровне 0,5 м разность температур между тундрой и степью превышала 6 °С, а в среднем ее значения составили около 1,4 °С.

5. Обсуждение

Полученные нами сведения о климате высокогорных котловин Алтая показывают, что развитие растительности лимитируется прежде всего низкими температурами. При лучшей теплообеспеченности, но при том же уровне климатического увлажнения, который существует в котловинах ($K = 0,61$ в Бертеке и $0,71$ — в районе Хиндиктиг-Холя) вполне могли бы существовать лесостепные ландшафты — для лесостепной зоны значения K меняются в пределах от $0,6$ до $1,0$ (Исаченко и Шляпников, 1989; Исаченко, 1991).

Однако низкие летние температуры в высокогорных котловинах делают невозможным произрастание древесной растительности. Изучение температурно-влажностных условий природных зон мира показывает, что равнинные лесостепи обычно существуют при средних температурах июля от 18°C и выше (Амосов и др., 2011), древесная растительность в лесотундрах распространена в районах с июльскими температурами около $12\text{--}13^{\circ}\text{C}$ (Исаченко и Шляпников, 1989), тогда как в районе Хиндиктиг-Холя этот показатель равен $10,8^{\circ}\text{C}$, а в Бертеке — $9,3^{\circ}\text{C}$.

Данные значения летних температур сопоставимы с теми, что наблюдаются в равнинных ландшафтах севера Евразии, где типичные и южные тундры наиболее часто встречаются при среднелетних температурах от $7,5$ до 12°C (Амосов и др., 2011). Полученные нами значения этого показателя для высокогорных котловин Алтая ($8,0^{\circ}\text{C}$ в Бертеке; $9,6^{\circ}\text{C}$ в районе Хиндиктиг-Холя) вполне укладываются в «тундровый» диапазон. Такое же соотношение и для средних июльских температур — в типичных и южных тундрах в Арктике этот показатель меняется в пределах $4\text{--}13^{\circ}\text{C}$ (Амосов и др., 2011); в этом же интервале располагаются значения июльских температур Бертека и Хиндиктиг-Холя. Таким образом, полученные нами показатели летних и июльских температур (табл. 2) указывают на потенциальную возможность развития тундровых сообществ в обеих котловинах.

Однако тундровая растительность нуждается в хорошем увлажнении. На равнинах в пределах тундровой зоны коэффициент K , как правило, превышает $1,5$ (Исаченко и Шляпников, 1989), тогда как в высокогорных котловинах Алтая этот показатель значительно меньше единицы. Таким образом, именно недостаток увлажнения препятствует сплошному распространению тундровых ценозов в Бертекской котловине и в районе Хиндиктиг-Холя.

Выявленные нами различия в показателях климатического увлажнения двух котловин хорошо соотносятся с особенностями их растительного покрова. В Бертекской котловине с ее более ксерофитной растительностью среднегодовые значения K понижены ($0,61$), а в районе Хиндиктиг-Холя, где наряду со степными участками широкое распространение имеют тундровые ценозы, этот показатель существенно выше — $0,74$. Поэтому в климатически лучше увлажненных условиях района Хиндиктиг-Холя тундровые группировки все же существуют, но только там, где повышенное увлажнение обеспечивается благодаря особенностям рельефа (северные экспозиции склонов и др.).

Климатограммы Болла — Тейлора, построенные для районов озера Хиндиктиг-Холь и Бертекской котловины (см. рис. 2, 3) подтверждают вывод о существовании неблагоприятных климатических условий как для древесной, так и для тундровой растительности.

Обе климатограммы указывают на недостаток термических ресурсов для произрастания растительности в течение большей части года. Термическая граница вегетации (+5 °С) в Бертекской котловине преодолевается только в три летних месяца. В районе Хиндиктиг-Холя условия несколько лучше — на климатограмме (см. рис. 2) видно, что значения майских температур расположены на термической вегетационной границе, что говорит о потенциальной возможности вегетации во второй половине мая.

Однако в Хиндиктиг-хольской котловине с середины мая до середины июля условия близки к засушливым. Дополнительным фактором увлажнения почв в это время может служить снеготаяние, хотя его роль не следует преувеличивать вследствие общей скудости снеготаяний. В конце лета кривая на диаграмме переходит в область большей увлажненности. С сентября по начало мая вегетации препятствуют низкие температуры.

В Бертекской котловине совместный показатель тепла и влаги в течение всего вегетационного периода находится вблизи линии раздела засушливых и увлажненных условий.

Для понимания процессов дифференциации степей и ерниковых тундр важное значение имеют сведения, полученные в ходе микроклиматических исследований. Как уже отмечалось, воздух над ерником прогревается значительно лучше, чем над степью. Основные причины такого явления, по-видимому, связаны с серьезными отличиями в радиационном балансе за счет разного альбедо (в среднем в степи 20–22%, в тундре — 12–14%) и в уменьшении скорости ветра в приземном слое над тундрой почти в 2–3 раза, что происходит вследствие большей шероховатости поверхности ерников. При этом стоит отметить, что в ранние утренние часы нередко наблюдалась своеобразная горизонтальная «инверсия», достигавшая 1,3 °С. В этом случае при низком положении солнца и практическом отсутствии разницы в альбедо, при весьма слабом ветровом воздействии воздух над степным участком прогревается быстрее. Но в целом следует констатировать благоприятные летние микроклиматические условия для произрастания ерника. Дополнительный фактор, благоприятствующий его развитию, — лучшее накопление снега с постепенным таянием вплоть до начала вегетационного периода. Со степных повышенных участков снег, наоборот, сдувается, и уже весной на них может ощущаться дефицит увлажнения.

Временной ход температуры и относительной влажности воздуха на высоте 2 м и под пологом ерника (на высоте около 5–7 см над поверхностью почвы) хорошо иллюстрируют графики на рис. 4, 5.

Анализ графиков указывает на очень интересные особенности термического режима в местах распространения ерниковой растительности, к которым можно отнести исключительный прогрев внутреннего воздушного пространства ерника в дневное время с достижением отметок почти в 36 °С и разницей с окружающим воздухом в 14–15 °С, с суточной амплитудой почти в 38 °С и преимущественно отрицательными значениями в ночное время. При этом пасмурная погода с осадками, как и следовало ожидать, сильно сглаживает эти различия в значительной степени (см., например, пик на рис. 4 около отметки 100 ч, когда наблюдался дождь и сильный порывистый ветер).

Учитывая, что средняя дневная температура почвы на глубине 5 см под ерником составляет всего 3,3 °С, а разность между степным и тундровым участками —

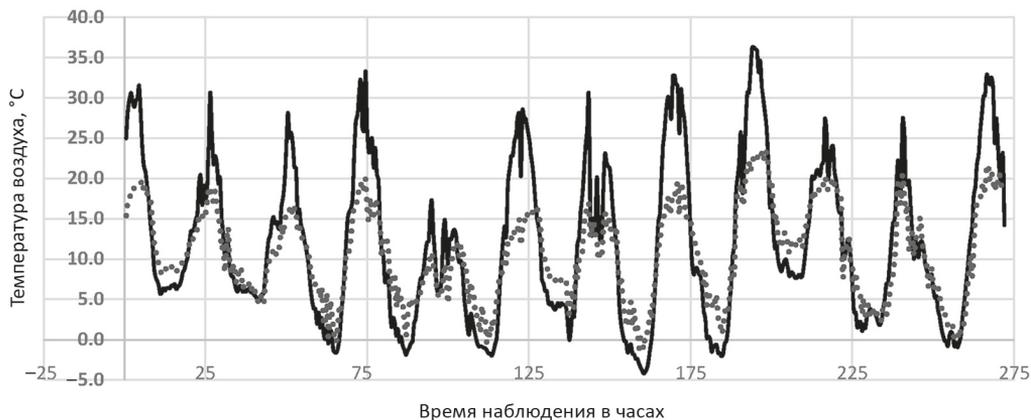


Рис. 4. Временной ход температуры воздуха на участке ерниковой тундры. Сплошная линия — показатель под пологом *Betula rotundifolia*, прерывистая линия — на высоте 2 м

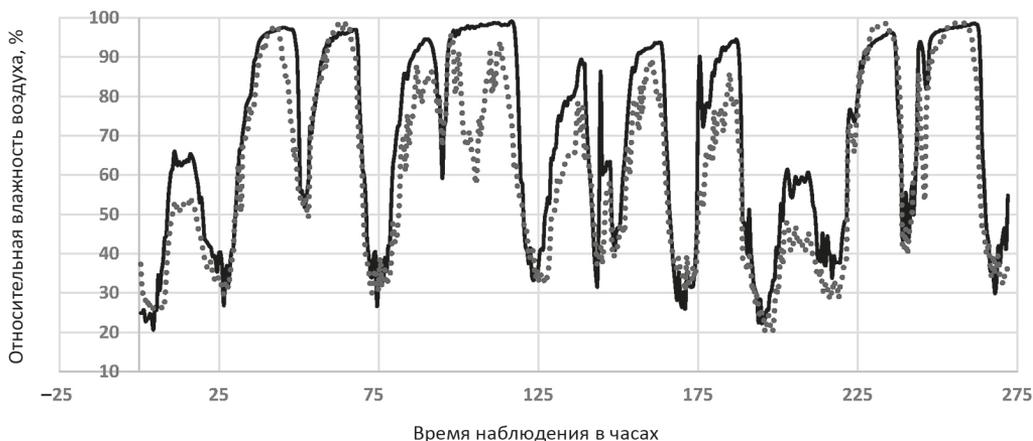


Рис. 5. Временной ход относительной влажности воздуха на участке ерниковой тундры. Сплошная линия — показатель под пологом *Betula rotundifolia*, прерывистая линия — на высоте 2 м

5,2°C, можно сделать вывод о весьма слабом потоке тепла в почву под ерником из-за термической изоляции самой почвы довольно плотным слоем опада и листовым покровом, которые ограждают почву от инсоляции и турбулентного переноса тепла. Под степью же, наоборот, радиационное тепло (меньшее из-за более высокого альбедо) тратится на нагрев нижележащих слоев почвы приблизительно в той же мере, как и воздуха. Ход значений относительной влажности воздуха направлен в сторону, противоположную ходу температур, и, соответственно, больших различий по вертикальному расположению не имеет за исключением пасмурных часов, когда ерник пропитывается водой и воздух внутри него подсыхает дольше, чем снаружи.

6. Заключение

Результаты изучения растительности Бертекской и Хиндиктиг-хольской высокогорных котловин показали, что для них наиболее типична степная растительность, при этом в районе Хиндиктиг-Холя наряду со степными существуют также и тундровые участки; в Бертекской котловине доля тундровой растительности элементов флоры незначительна.

В районе Хиндиктиг-Холя расположение степных и тундровых участков зависит прежде всего от экспозиции склонов. В отдельных случаях наблюдается мелкоконтурное (мозаичное) сочетание тундровой и степной растительности, причем тундровые участки занимают места с лучшими условиями снегонакопления.

В результате сопоставления данных о растительном покрове котловин со сведениями об их климате получены следующие результаты.

Степная растительность котловин, а также сочетания тундр и степей формируются в условиях непродолжительного вегетационного периода, причем растительный покров испытывает на себе неблагоприятное воздействие как низких температур (летние температуры намного ниже тех, что типичны для равнинных степей; по этому показателю котловины напоминают ландшафты тундровой зоны), так и плохого увлажнения (запасы влаги в зимний период невелики, период с хорошо выраженным избытком влаги весьма недолог).

Различие в растительном покрове Хиндиктиг-Холя и Бертекской котловины определяется разным климатическим увлажнением. В районе Хиндиктиг-Холя увлажнение выше ($K = 0,74$ против $0,61$ в Бертеке), благодаря чему в этой котловине представлены не только степные, но и тундровые ценозы.

Микроклиматические наблюдения на смежных участках с разной растительностью, проведенные вблизи Хиндиктиг-Холя, показали, что виды, слагающие ерниковые тундры, обладают такими особенностями, которые сами создают благоприятные условия для существования ценоза. По сравнению со степными участками воздух над ерниками нагревается лучше, под их пологом в дневное время он также более прогрет. Кроме того, ерники задерживают снег, что способствует лучшему увлажнению почвы.

Благодаря особенностям ерников и их влиянию на микроклимат обеспечивается повышенная контрастность растительного покрова и наличие мелкоконтурных сочетаний тундр и степей. Результат этого — своеобразный тундростепной облик растительности, наблюдаемый в районе Хиндиктиг-Холя.

По особенностям климата изученные степи и тундростепи не имеют аналогов среди современных природных зон на равнинах Евразии.

Литература

- Амосов, М. И., Артемьев, Ю. М., Москаленко, И. Г., Сыромятина, М. В., 2011. Температурно-влажностные условия природных зон мира. Вестник СПбГУ. Сер. 7: Геология, география 3, 100–108.
- Асадулаев, З. М., Рамазанова, З. Р., Садыкова, Г. А., 2013. Сравнительная оценка климатодиаграмм и их модификаций при интерпретации ботанических исследований. Вестник Дагестанского научного центра 50, 42–48.
- Готт, Н. В., 2015. Почвы юго-западной части Джулукульской котловины, Республика Алтай. Почвоведение 6, 656–667.
- Дажо, Р. 1975. Основы экологии. Прогресс, Москва.

- Дьяченко, С. А., 2000. Флора плоскогорья Укок и ее охрана. Барнаул.
- Иванов, Б. Г., 1960. Годовое испарение в основных географических зонах. Известия АН СССР, Серия: География и геофизика 3, 104–126.
- Иванов, Н. Н., 1948. Ландшафтно-климатические зоны Земного шара. Изд-во Академии наук СССР. Москва, Ленинград.
- Исаченко, А. Г., 1991. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. Высшая школа, Москва.
- Исаченко, А. Г., Шляпников, А. А., 1989. Природа мира. Ландшафты. Мысль, Москва.
- Кривоносов, Б. М., 1975. Климаты Горного Алтая. Томск.
- Кумина, А. В., 1960. Растительный покров Алтая. Новосибирск.
- Кумина, А. В., Седельников, В. П., Маскаев, Ю. М., 1985. Растительный покров и естественные кормовые угодья Тувинской АССР. Новосибирск.
- Лесовая, С. Н., Горячкин, С. В., 2007. Криогенные почвы высокогорий Алтая: морфология, минералогия, генезис, проблемы классификации и связь с почвами полярных областей. Материалы Международной конференции. Криогенные ресурсы полярных регионов. Салехард, 96–99.
- Макунина, Н. И., 2018. О тундростепи в горах Южной Сибири. Материалы IV Международной научной конференции «Экология и география растений и растительных сообществ». Екатеринбург, 533–537.
- Михайлов, Н. Н., Чистяков, К. В., Амосов, М. И., Иванов, А. Ю., Пономарева, Д. П., Потахин, С. Б., Селиверстов, Ю. П., Чернова, Г. М., 1992. Геоэкология горных котловин / Селиверстов, Ю. М. (под ред.), Изд-во ЛГУ, Ленинград.
- Огурева, Г. Н., 1980. Ботаническая география Алтая. Москва.
- Полевой определитель почв России, 2008. Почвенный институт им. В. В. Докучаева, Москва.
- Самойлова, Г. С., Веселовский, А. В., Маханова, Т. М., Платэ, А. Н., 2003. Ландшафтная карта Алтае-Саянского экорегиона. Масштаб 1 : 2 235 000. Москва.
- Харламова, Н. Ф., 2004. Климатические особенности плоскогорья Укок и прилегающих территорий. Известия Алтайского университета 3, 71–77.
- Чистяков, К. В., Ганюшкин, Д. А., Москаленко, И. Г., Зелепукина, Е. С., Амосов, М. И., Волков, И. В., Глебова, А. Б., Гузель, Н. И., Журавлев, С. А., Прудникова, Т. Н., Пряхина, Г. В., 2012. Горный массив Монгун-Тайга / Чистяков, К. В. (под ред.). Арт-Экспресс, Санкт-Петербург.
- Chytrý, M., Horsák, M., Danihelka, J., Ermakov, N., German, D. A., Hajek, M., Hajkova, P., Koci, M., Kubesova, S., Lustyk, P., Nekola, J. C., Pavelkova Ricankova, V., Preislerova, Z., Resl, P., Valachovic, M., 2018. A modern analogue of the Pleistocene steppe-tundra ecosystem in southern Siberia. *Boreas* 48, 36–56. <https://doi.org/10.1111/bor.12338>.
- Pavelkova Ricankova, V., Robovsky, J., Riegert, J., 2014. Ecological structure of Recent and Last Glacial mammalian faunas in northern Eurasia: the case of Altai-Sayan refugium. *PLoS ONE* 9, e85056, 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085056>.

Статья поступила в редакцию 28 декабря 2018 г.
Статья рекомендована в печать 1 октября 2019 г.

Контактная информация:

Чистяков Кирилл Валентинович — k.chistyakov@spbu.ru
Амосов Михаил Иванович — mamosov@mail.ru
Волков Илья Владимирович — iliavolkov1990@gmail.com
Курочкин Юрий Николаевич — Kurant51@mail.ru
Лесовая Софья Николаевна — sofia.lessovaia@mail.ru
Манакова Мария Владимировна — maria.manakova.spb@gmail.com
Нехуженко Наталья Александровна — n.nehuzhenko@spbu.ru
Стрелков Иван Иванович — archer792@gmail.com
Тюсов Григорий Анатольевич — tyusov@binran.ru
Шастина Галина Николаевна — galina_shastina@mail.ru

Climatic Conditions of Steppe and Tundra Formations in the Altai Highland Depressions*

K. V. Chistyakov¹, M. I. Amosov¹, I. V. Volkov¹, Yu. N. Kurochkin¹, S. N. Lessovaia¹, M. V. Manakova¹, N. A. Nehuzhenko¹, I. I. Strelkov¹, G. A. Tyusov^{1,2}, G. N. Shastina¹

¹ St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² Komarov Botanical Institute of Russian Academy of Science,

2, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197376, Russian Federation

For citation: Chistyakov, K. V., Amosov, M. I., Volkov, I. V., Kurochkin, Yu. N., Lessovaia, S. N., Manakova, M. V., Nehuzhenko, N. A., Strelkov, I. I., Tyusov, G. A., Shastina, G. N. (2019). Climatic Conditions of Steppe and Tundra Formations in the Altai Highland Depressions. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (4), 612–627. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.407> (In Russian)

Data on the climate and vegetation of the Altai highland depressions are mapped in this paper. The Bertek depression (located 2200–2400 m above sea level) and the lake depression of Khindikhtig-Khol' (2300–2400 m a.s.l.) were chosen as study objects. The investigation is based on information about vegetation and microclimatic differences obtained during 2018 field research. Long-term observations of Bertek and Mugur-Aksy meteorological stations are applied to climate characteristics. Steppe vegetation is typical for the depressions. Tundra species also exist alongside steppe ones within the Khindikhtig-Khol' region, though in some cases a mosaic of tundra and steppe is found. Tundra communities are insignificant within the Bertek depression. Vegetation cover of the depressions develops under the conditions of a short-term vegetation period and undergoes the negative impact of low summer temperatures (mean July temperatures in Bertek are 9.3 °C; in Khindikhtig-Khol'—10.8 °C). The data are significantly lower than the mean temperatures of the flat steppe zone. Taking into account the temperature data, the investigated areas are associated with the tundra zone. The climate humidification level is not enough to develop the continuous cover of tundra cenosis (Vysotskii-Ivanov's precipitation-evaporation ratio of Khindikhtig-Khol' equals 0.74; in Bertek — 0.61). According to the fact above, the Khindikhtig-Khol' depression is more humid, and the tundra communities live together with the steppe vegetation. Microclimatic observations of the neighboring areas with different tundra and steppe cenoses show that the species composing tundra with the dwarf birch (*Betula rotundifolia*) have unique features that create favorable conditions for the existence of this community. In comparison with the steppe area, the air during the daytime heats up better not only above the tundra pattern, but also beneath it. Moreover, the dwarf birch (*Betula rotundifolia*) maintains snow cover, which results in better soil humidification. Consequently, the vegetation cover is more diverse in the Khindikhtig-Khol' depression, making it possible to figure out the appearance of its exclusive tundra and steppe mixture.

Keywords: Mongun-Taiga, Ukok, meteorological station HOBO, climatograph, precipitation-evaporation ratio, tundra, steppe, *Betula rotundifolia*, *Dryas oxyodonta*, *Kobresia*, *Festuca*, *Helictotrichon*, *Poa*.

References

- Amosov, M. I., Artem'ev, Iu. M., Moskalenko, I. G., Syromiatina, M. V., 2011. Temperature-humidity conditions of the world vegetation zones. *Vestnik SPbGU. Seria 7: Geologiya. Geografiia* 3, 100–108. (In Russian)
- Asadulaeva, Z. M., Ramazanova, Z. R., Sadykova, G. A., 2013. Comparison of climadiagramms and their modifications when interpreting botanical researchers. *Vestnik Dagestanskogo nauchnogo tsentra* 50, 42–48. (In Russian)

* This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant № 18-05-00860 A).

- Chistyakov, K. V., Ganiushkin, D. A., Moskalenko, I. G., Zelepukina, E. S., Amosov, M. I., Volkov, I. V., Glebova, A. B., Guzel', N. I., Zhuravlev, S. A., Prudnikova, T. N., Priakhina, G. V.*, 2012. Mountain Massif of Mongun-Taiga / Chistyakov, K. V. (Ed). Art-Ekspress Publ., St. Petersburg. (In Russian)
- Chytry, M., Horsak, M., Danihelka, J., Ermakov, N., German, D. A., Hajkova, P., Koci, M., Kubsova, S., Lustyk, P., Nekola, J. C., Pavelkova Ricankova, V., Preislerova, Z., Resl, P., Valachovic, M.*, 2018. A modern analogue of the Pleistocene steppe-tundra ecosystem in southern Siberia. *Boreas* 48, 36–56. <https://doi.org/10.1111/bor.12338>
- Dazho, R.*, 1975. Introduction to Ecology. Progress Publ., Moscow. (In Russian)
- D'iachenko, S. A.*, 2000. Flora of the Ukok Plateau and its protection. Barnaul. (In Russian)
- Gopp, N. V.*, 2015. Soils of the south-west part of Dzhulukul basin, Altai republic. *Pochvovedenie* 6, 656–667. (In Russian)
- Ivanov, B. G.*, 1960. Annual evaporation of main natural zones. *Izvestia AN SSSR, Seria: Geografiia i geofizika* 3, 104–126. (In Russian)
- Ivanov, N. N.*, 1948. Landscape climatic zones of the Earth. *Izd-vo Akademii nauk SSSR. Moscow, Leningrad.* (In Russian)
- Isachenko, A. G.*, 1991. Landscape studies and physical-geographical regionalization. *Vysshaia shkola Publ., Moscow.* (In Russian)
- Isachenko, A. G., Shliapnikov, A. A.*, 1989. World Nature. Landscapes. Mysl' Publ., Moscow. (In Russian)
- Kharlamova, N. F.*, 2004. Climate characteristics of Ukok Plateau and adjacent areas. *Izvestia Altaiskogo Universiteta* 3, 71–77. (In Russian)
- Krivososov, B. M.*, 1975. Climates of Gorny Altai. Tomsk. (In Russian)
- Kuminova, A. V.*, 1960. Vegetation cover of Altai. Novosibirsk. (In Russian)
- Kuminova, A. V., Sedel'nikov, V. P., Maskaev, Iu. M.*, 1985. Vegetation cover and natural forage lands of Tuvan ASSR. Novosibirsk. (In Russian)
- Lesovaia, S. N., Goriachkin, S. V.*, 2007. Cryogenic soils of Altai high mountain belt: morphology, mineralogy, genesis, problems of classification and relation to soils of polar regions. In: *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii. Kriogennye resursy poliarnykh regionov.* Salekhard, 96–99. (In Russian)
- Makunina, N. I.*, 2018. Of tundra-steppe in the South Siberian Mountains. In: *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Ekologiya i geografiia rastenii i rastitel'nykh soobshchestv"*, Ekaterinburg, 533–537. (In Russian)
- Mikhailov, N. N., Chistiakov, K. V., Amosov, M. I., Ivanov, A. Yu., Ponomareva, D. P., Potakhin, S. B., Seliverstov, Yu. P., Chernova, G. M.*, 1992. Geoecology of highland depressions / Seliverstov, Iu. P. (Ed). *Izd-vo LGU, Leningrad.* (In Russian)
- Ogureeva, G. N.*, 1980. Botanical geography of Altai. Moscow. (In Russian)
- Pavelkova Ricankova, V., Robovsky, J., Riegert, J.*, 2014. Ecological structure of Recent and Last Glacial mammalian faunas in northern Eurasia: the case of Altai-Sayan refugium. *PLoS ONE* 9, e85056, 1-9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085056>
- Samoilova, G. S., Veselovskii, A. V., Makhanova, T. M., Plate A. N.*, 2003. Landscape map of Altai-Saian ecoregion. Scale 1 : 2 235 000. Moscow. (In Russian)
- Soil field guide of Russia, 2008. *Pochvennyi institute imeni V. V. Dokuchaeva Publ., Moscow.* (In Russian)

Received: December 28, 2018

Accepted: October 1, 2019

Contact information:

Kirill V. Chistyakov — k.chistyakov@spbu.ru
Mikhail I. Amosov — mamosov@mail.ru
Ilya V. Volkov — iliavolkov1990@gmail.com
Yuriy N. Kurochkin — Kurant51@mail.ru
Sofia N. Lessovaia — sofia.lessovaia@mail.ru
Maria V. Manakova — maria.manakova.spb@gmail.com
Natalia A. Nehuzhenko — n.nehuzhenko@spbu.ru
Ivan I. Strelkov — archer792@gmail.com
Gregory A. Tyusov — tyusov@binran.ru
Galina N. Shastina — galina_shastina@mail.ru