

Картографические модели температурных полей почв степных котловин Хакасии и Тывы на основе совместного анализа наземных и спутниковых данных

© 2024 С. Я. Кудряшова ¹, А. С. Чумбаев ¹, С. С. Курбатская ²

¹ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: kudryashova@issa-siberia.ru; chumbaev@issa-siberia.ru

²ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, улица Интернациональная, 117А, Кызыл, 667007, Россия. E-mail: ana.kurbatskaya@mail.ru

Цель исследования. Обоснование возможности использования количественных характеристик температурного режима почв, полученных на основе совместного анализа наземного и спутникового мониторинга для создания картографических моделей типологических единиц почвенно-биоклиматической зональности степных котловин Хакасии и Тывы.

Место и время проведения. Отработка методических положений выделения границ температурных полей проведена в период 2019–2022 гг. на примере типологических единиц почвенного покрова Алтае-Саянского региона, включающего разнообразие степей Чулымо-Енисейского и Минусинского прогибов, Турано-Уюкской, Центрально-Тувинской, Убсу-Нурской котловин. Ключевые участки выбраны с учетом принципов ландшафтного районирования, которые позволяют распознавать, классифицировать и картографировать ландшафтно-дифференцирующие факторы, компоненты ландшафта, региональную ландшафтную структуру в целом и ее динамические особенности.

Методы. Наземный автоматизированный мониторинг воздуха и почв был организован с использованием специализированного регистратора температуры DS-1921G “Thermochron” с учетом показателей, отражающих генетическое единство типов климата Алтае-Саянского региона. Для проведения ретроспективного анализа, статистической обработки и визуализации данных MODIS, использовался созданный в ИВТ СО РАН программно-алгоритмический инструментарий, базирующийся на новой технологии доступа к архиву спутниковых данных, реализованной с использованием СУБД PostgreSQL с дополнительным модулем, который предназначен для прямого доступа к файловому архиву данных без необходимости предварительного копирования и преобразования формата данных для СУБД.

Основные результаты. На основе совместного анализа количественных показателей температурного режима воздуха и почвы, полученных с использованием наземных автоматизированных измерительных комплексов и спутниковых данных, создана серия картографических моделей, отражающих особенности температурных полей типологических единиц почвенно-биоклиматической зональности Алтае-Саянского региона. Интерпретация выделения типологических единиц структурной организации почвенного покрова представлена на основе статистического анализа совмещения границ и информационного содержания контуров почвенного покрова и границ температурных полей – дневных и ночных температур, а также разницы температур двух скомпилированных серий, рассчитанных за 16-ти летний период. Новизна подхода заключается в том, что картографические модели температурных полей, созданные на основе количественных показателей температур, обладают достаточной информативностью, позволяющей устанавливать взаимосвязи температурного режима с другими характеристиками объектов природной среды и подойти к решению проблемы выделения и типологии почвенно-экологических границ.

Заключение. Картографические модели температурных полей, полученные в результате совместного анализа наземных и спутниковых данных, обладают достаточной информативностью в отношении энергетики почвообразовательных процессов и могут быть использованы для оценки термических условий почв малоисследованных и труднодоступных территорий Алтае-Саянского региона.

Ключевые слова: степные котловины; температурные поля почв; картографическое моделирование; наземный и спутниковый мониторинг.

Цитирование: Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С., Курбатская С.С. Картографические модели температурных полей почв степных котловин Хакасии и Тывы на основе совместного анализа наземных и спутниковых данных // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e240. DOI: [10.31251/pos.v7i1.240](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.240)

ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях, связанных с созданием методологических основ изучения пространственной организации почвенного покрова и его картографирования с использованием дистанционных

методов, одной из наиболее важных задач является проблема выделения и типологии почвенно-экологических границ. Разработка методов выделения структурных единиц почвенного типологического разнообразия и теоретическое обоснование критериев выделения контурных границ особенно актуальны для объективного отображения почвенного покрова территорий с высокой сезонной динамичностью развития растительности, которая значительно снижает индикационные возможности растительного покрова для определения компонентного состава или преобладающего типа почв.

Почвенно-экологические границы могут рассматриваться как функциональные, отображающие определенные почвенные процессы, или факторные, которые проводятся по одному или группе факторов почвообразования (Корсунов и др., 2002). Одним из важнейших факторов формирования процессных и функциональных почвенно-экологических границ является температурный режим почв, характеризующий, совместно с гидрологическим режимом, общий энергетический уровень почвообразования. Температурное поле почв представляет собой совокупность значений температуры в точках пространственной области и может рассматриваться в качестве ведущего фактора структурно-функциональной организации почвенного покрова.

Для целей дистанционного тематического картографирования используются свойства почв, которые тесно коррелируют с экологическими характеристиками окружающей среды и обусловлены действием факторов почвообразования (Minasny, McBratney, 2016; Arrouays et al., 2020; Sekertekin, Bonafoni, 2020; Galve et al., 2022). В наиболее полном виде факторы, определяющие свойства почв в определенной точке исследуемого пространства, отражены в модели SCORPAN – почвенной пространственно предсказывающей функции, которая предполагает, что одинаковому сочетанию почвообразующих факторов-предикторов соответствуют почвы сходного генезиса, а границы почвенных структур обусловлены изменением факторов дифференциации почвенного покрова. Выделение наиболее информативных предикторов осуществляется с использованием подходов педотрансферных методов, которые позволяют рассчитывать педотрансферные функции – уравнения связи, описывающие функциональные соотношения базовых почвенных свойств и характеристик почвенного географического пространства (Bouma, 1989; Pachepsky, Rawals, 1999; McBratney et al., 2002; Shein, Arkhangel'skaya, 2006; Paradian et al., 2018). Основное отличие данной методологии состоит в том, что по совокупности выбранных количественных почвенно-экологических показателей можно перейти к ее таксономической характеристике. Такой подход позволяет по совокупности однородных почвообразующих факторов-предикторов пространственно разделять ареалы почв и проводить между ними контурные границы.

В этой связи, целью данного исследования являлось обоснование возможности использования количественных характеристик температурного режима почв, полученных на основе совместного анализа наземного и спутникового мониторинга для создания картографических моделей типологических единиц почвенно-биоклиматической зональности сухостепных котловин Хакасии и Тывы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наземный автоматизированный мониторинг воздуха и почвы был организован с использованием автономного регистратора температуры DS-1921G “Thermochron”, с учетом показателей, отражающих генетическое единство типов климата Алтае-Саянского региона. Для фиксации температуры воздуха автономный регистратор был установлен на высоте 2 м от поверхности почвы в условиях, исключающих прямое радиационное воздействие. Динамика изменения температур на поверхности почвы и по горизонтам почвенного профиля фиксировалась регистраторами в течение года с интервалом 4 часа. В результате выполненных наблюдений был получен большой объем фактических данных, который использовался в качестве основы для расчета термических ресурсов температурных полей и выявления их временных трендов (Кудряшова и др., 2018; Мамаш и др., 2023). Для проведения ретроспективного анализа, статистической обработки и визуализации данных MODIS использовался созданный в ИВТ СО РАН оригинальный программно-алгоритмический инструментарий, базирующийся на новой технологии доступа к архиву спутниковых данных, реализованной с использованием СУБД PostgreSQL с дополнительным модулем (Синявский и др., 2016; Синявский, Рылов, 2018). Этот модуль предназначен для прямого доступа к файловому архиву данных без необходимости предварительного копирования и преобразования формата данных для СУБД. Он реализует прозрачное отображение файлового архива спутниковых снимков в виртуальные таблицы базы данных. Модуль позволяет выполнять произвольные SQL-запросы к данным файлового архива, при этом планировщик запросов

оптимизирует их выполнение на основе доступных метаданных, а применяемые для выполнения вычислений алгоритмы предусматривают работу с объемами информации, превосходящими емкость оперативной памяти сервера СУБД. Тематическая обработка космических снимков была проведена с помощью предложенных авторами оригинальных непараметрических методов и технологий сегментации спутниковых изображений, позволяющих учитывать как спектральные и пространственные признаки, так и данные наземных наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отработка методических положений выделения границ температурных полей проведена на примере типологических единиц почвенного покрова Алтае-Саянского региона, включающего разнообразие степей Чулымо-Енисейского и Минусинского прогибов, Турано-Уюкской, Центрально-Тувинской и Убсу-Нурской котловин. Ключевые участки выбраны с учетом принципов ландшафтного районирования, которые позволяют распознавать, классифицировать и картографировать ландшафтно-дифференцирующие факторы, компоненты ландшафта, региональную ландшафтную структуру в целом и ее динамические особенности. В качестве источников информации использовались космические снимки Landsat 8/9 (рис. 1). Тематические почвенные и климатические карты использовались как вспомогательные при дешифрировании космических снимков.

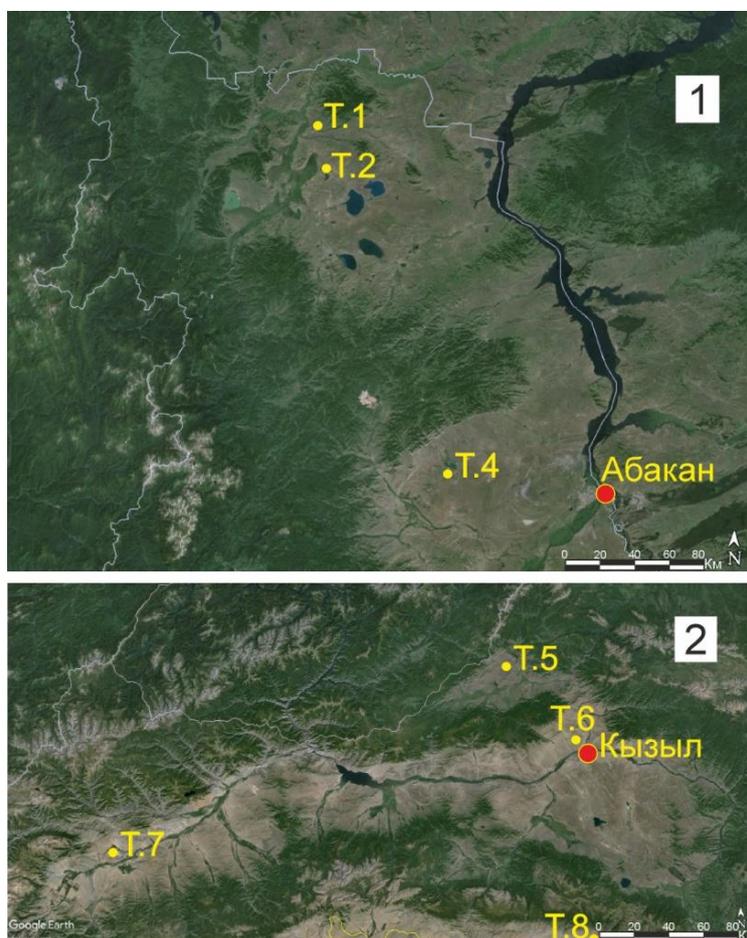


Рисунок 1. Местоположение ключевых участков в степных котловинах Республики Хакасия (1) и Республики Тыва (2).

Межгорные котловины Хакасии и Тывы расположены в восточном секторе Алтае-Саянской горной области в следующей последовательности с севера на юг – Северо-Минусинская, Южно-Минусинская, Турано-Уюкская, Центрально-Тувинская и Убсу-Нурская. Высотные отметки днищ котловин увеличиваются в южном направлении от 300 до 500 м над уровнем моря в котловинах Хакасии и от 700 до 900 м над уровнем моря в котловинах Тывы. В этом же направлении увеличивается континентальность климата – от наиболее мягких климатических условий в Северо-Минусинской котловине, до наиболее сурового типа термического режима в Убсу-Нурской.

Особенности распространения и специфика формирования термических условий степей левобережной части Енисея, Минусинской котловины (Хакасия) связаны с их расположением между горными сооружениями Кузнецкого Алатау, Восточного и Западного Саяна (рис. 2).

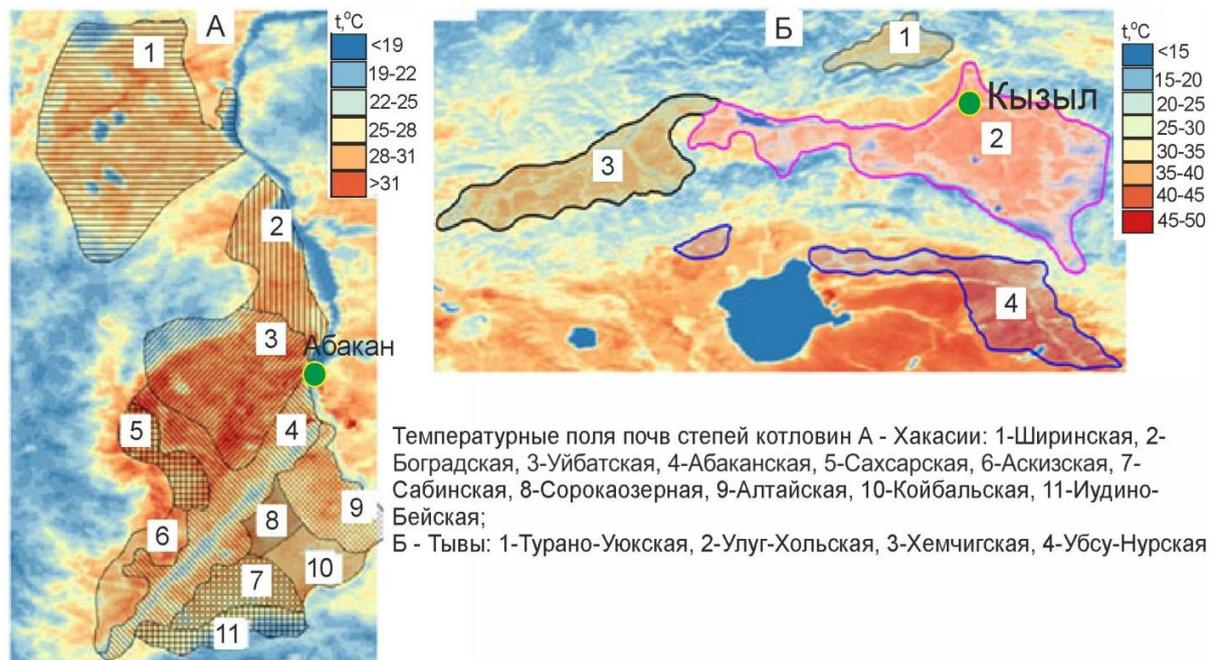


Рисунок 2. Карта-схема температурных полей почв степных котловин Республики Хакасия (А) и Республики Тыва (Б).

Контрастность климатических режимов воздуха и почв в котловинах Хакасии формируется в зависимости от выраженности направления переноса влаги, которое в восточном секторе Алтае-Саянской горной области имеет западную, сменяющуюся на северо-западную ориентацию (табл. 1).

Таблица 1

Суммы температур воздуха и почв степных котловин Хакасии
 (сумма температур, °С / количество дней с данной температурой)

| Температуры | Сумма температур воздуха | Сумма температур почвы по глубинам (см) | | | | |
|---|--------------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 0 | 10 | 20 | 30 | 50 |
| Ужуро-Копьевская луговая степь, с. Копьево, т.1 (54°56'19,6" с.ш., 89°52'47,1" в.д.). | | | | | | |
| все | 424,7 | 908,2 | 791,8 | 940,3 | 888,3 | 989 |
| ≥10° | 1461,5/89 | 1674,5/100 | 1427,2/90 | 1400,7/90 | 1205,3/77 | 1202,9/83 |
| ≥5° | 1755,3/131 | 1917,3/133 | 1742,8/133 | 1711,8/132 | 1571,8/123 | 1508,5/126 |
| >0° | 1845,6/168 | 2026,7/176 | 1827,2/173 | 1819,3/183 | 1706,3/179 | 1631,8/177 |
| ≤0° | -1420,9/165 | -1118,5/157 | -1035,3/160 | -879/150 | -817,9/154 | -642,8/156 |
| среднегодовая | 1,3 | 2,7 | 2,4 | 2,8 | 2,7 | 3,0 |
| Ширинская озерно-котловинная степь, оз. Тус, т.2 (54°45'17,2" с.ш., 89°57'17,9" в.д.). | | | | | | |
| все | 430,5 | 1076,5 | 1146,2 | 872,3 | 1121,8 | 915,3 |
| ≥10° | 1558,8/90 | 1875,1/105 | 1707,9/100 | 1428,1/90 | 1359,9/87 | 1075,6/76 |
| ≥5° | 1859,6/130 | 2161/144 | 2020,7/141 | 1760,9/136 | 1721/135 | 1422,8/124 |
| >0° | 1974,5/169 | 2244,2/181 | 2127,2/185 | 1846/172 | 1842,5/183 | 1554,3/177 |
| ≤0° | -1544/164 | -1168,2/152 | -980/148 | -973,7/161 | -720,8/150 | -639/156 |
| среднегодовая | 1,3 | 3,2 | 3,4 | 2,6 | 3,4 | 2,7 |
| Уйбатская равнинно-холмистая солонцеватая степь, оз. Улуг-Холь, т.4 (53°47'30,1" с.ш., 90°38'39,8" в.д.). | | | | | | |
| все | 371,7 | 322 | 283 | 390,6 | 389,4 | 531,3 |
| ≥10° | 1630,8/95 | 1785,7/105 | 1457,8/94 | 1363,7/90 | 1168,5/80 | 1091/79 |
| ≥5° | 1927,1/135 | 2059,4/142 | 1732,8/130 | 1674,9/132 | 1523/127 | 1407,8/121 |
| >0° | 2010,1/170 | 2118,6/164 | 1829,3/170 | 1767,4/169 | 1634,9/166 | 1553,8/174 |
| ≤0° | -1638,4/163 | -1796,6/169 | -1546/163 | -1367,8/164 | -1245,5/167 | -1022,5/159 |
| среднегодовая | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 1,2 | 1,2 | 1,6 |

Климатические условия, как комплекс экологических факторов, оказывают непосредственное влияние на формирование температурных полей почвенного покрова котловинных степей Хакасии. В районах Ужуро-Копьевской и Ширинской степей, в которых средняя годовая температура воздуха составляет 1,3°, продолжительность безморозного периода – 168 дней и $\Sigma t \geq 10^\circ\text{C} = 1461^\circ$ и 1558°, соответственно, преобладают черноземы южные и обыкновенные, занимающие от 14 до 34% площади котловин. В Уйбатской степи, расположенной в непосредственной близости с восточными предгорьями Кузнецкого Алатау, средняя годовая температура воздуха составляет -1,1°, продолжительность безморозного периода – 170 дней и $\Sigma t \geq 10^\circ\text{C} = 1630^\circ$. Поэтому здесь находится наиболее ксерофильное ядро степной растительности и формируются малопродуктивные солонцовые почвы. Температурный режим почв степных котловин Хакасии определяется не только температурой воздуха, но и наличием растительности на поверхности изучаемых почв, особенно в теплый период. Так, обращает на себя внимание существенный перепад в суммах температур $\geq 10^\circ$ между слоями 10–20 и 20–30 см и отсутствие разницы этих значений между слоями 20–30 и 30–50 см в почвах Ужуро-Копьевской луговой степи (см. табл. 1). Поверхность почв в исследуемой степи Хакасии покрыта высокостебельной травяной луговой растительностью, которая является естественным регулятором температурного режима для почв региона. Данная степь самая северная среди других исследуемых степей Хакасии и сумма положительных температур здесь ниже, чем в более южных степях региона. Совокупность этих двух факторов оказывает более значительное воздействие на температурный режим верхнего 30-сантиметрового слоя, чем на нижележащие слои.

На территории Тывы выделяются четко различающиеся по климатообразующим факторам и термическим условиям почвообразования Турано-Уюкская, Центрально-Тувинская и Убсу-Нурская степные котловины. Температурные поля почв котловин Тывы могут рассматриваться как показатели различий в комплексе климатических условий, структурной организации и функционирования почвенного покрова (табл. 2).

Таблица 2

Суммы температур воздуха и почв степных котловин Тывы
(сумма температур, $^\circ\text{C}$ / количество дней с данной температурой)

| Температура | Сумма температур воздуха | Сумма температур почвы по глубинам (см) | | | |
|--|--------------------------|---|-------------|-------------|-------------|
| | | 0 | 10 | 20 | 50 |
| Турано-Уюкская котловина, Туран, т.5 (52°08'18,8" с.ш., 93°49'25" в.д.) | | | | | |
| все | -752,3 | -85,7 | -25,5 | -33,5 | 42,6 |
| $\geq 10^\circ$ | 1572,8/95* | 1754,1/96 | 1470,3/88 | 1284,9/82 | 908,9/70 |
| $\geq 5^\circ$ | 1768,5/121 | 1951,4/124 | 1726/124 | 1536,5/116 | 1210,3/112 |
| $> 0^\circ$ | 1874/160 | 2026,5/152 | 1822,8/161 | 1660/163 | 1312,7/156 |
| $\leq 0^\circ$ | -2626,3/169 | -2112,3/177 | -1843,8/168 | -1693,5/166 | -1270,3/171 |
| среднегодовая | -2,3 | -0,3 | -0,1 | -0,1 | 0,1 |
| Улуг-Хемская котловина, Кызыл, т.6 (51°44'36,5" с.ш., 94°19'34,4" в.д.) | | | | | |
| все | 121,5 | 787,3 | 1126,7 | 598,3 | 923 |
| $\geq 10^\circ$ | 2043,3/107 | 2327,3/120 | 2151,3/121 | 1995,1/112 | 1730,1/107 |
| $\geq 5^\circ$ | 2349,9/149 | 2603,5/156 | 2458,9/163 | 2268,9/148 | 2083,8/156 |
| $> 0^\circ$ | 2440,7/180 | 2672,4/183 | 2515,4/192 | 2350,5/179 | 2157/183 |
| $\leq 0^\circ$ | -2319,2/149 | -1882,5/146 | -1752,3/137 | -1388,8/150 | -1234/126 |
| среднегодовая | 0,4 | 2,4 | 3,4 | 1,8 | 2,8 |
| Хемчикская котловина, Ак-Довурак, т.7 (51°13'0,2" с.ш., 90°31'38" в.д.) | | | | | |
| все | -203,3 | 567,2351,8 | 351,8 | 185,1 | 596,3 |
| $\geq 10^\circ$ | 2034,2/110 | 2484,9/125 | 2238,1/121 | 2155,7/118 | 2117,8/117 |
| $\geq 5^\circ$ | 2320,7/148 | 278,4/154 | 2450,5/149 | 2399,7/150 | 2376,7/151 |
| $> 0^\circ$ | 2383,6/174 | 2767/177 | 2511,3/175 | 2459,7/173 | 2440,3/170 |
| $\leq 0^\circ$ | -2586,9/155 | -2199,8/152 | -2159,5/154 | 1994,9/156 | -1844/159 |
| среднегодовая | -0,6 | 1,7 | 1,1 | 0,6 | 1,8 |
| Убсу-Нурская котловина, оз. Тере-Холь, т.8 (50°15'23,4" с.ш., 95°0,2'32,3" в.д.) | | | | | |
| годовая | -653,1 | 794 | 579,5 | 658,6 | 882,8 |
| $\geq 10^\circ$ | 2207/125 | 2575/132 | 2400/133 | 2320/131 | 2226/128 |
| $\geq 5^\circ$ | 2407/151 | 2755/155 | 2522/150 | 2480/154 | 2448/158 |
| $> 0^\circ$ | 2461/169 | 2830/182 | 2603/179 | 2542/179 | 2496/179 |
| $\leq 0^\circ$ | -3114/172 | -2035/159 | -2024/162 | -1884/162 | -1613/162 |
| среднегодовая | -1,9 | 2,3 | 1,7 | 1,9 | 2,6 |

Турано-Уюкская котловина, расположенная на высоте 700–900 м н.у.м. по основным показателям климатического режима – средней годовой температуре воздуха ($-2,3^{\circ}$), продолжительности безморозного периода (160 дней) и $\Sigma t_{\geq 10^{\circ}\text{C}}=1573^{\circ}$ приближается к условиям зоны засушливых степей, в которых под разреженными разнотравно-полынно-злаковыми ассоциациями формируются черноземы обыкновенные или южные.

Термические условия Улуг-Хемской и Хемчикской котловин, днища которых имеют отметки 600–800 м н.у.м. характеризуются более высокой средней годовой температурой воздуха ($-0,4^{\circ}$), более длительной продолжительностью безморозного периода (180 дней) и сравнительно схожими $\Sigma t_{\geq 10^{\circ}\text{C}}=2043^{\circ}$ и 2034° , соответственно. В Улуг-Хемской котловине в зависимости от гидротермических условий под разнотравно-злаковыми ассоциациями степной растительности формируются черноземы обыкновенные и южные. В Хемчикской котловине под разреженными полынно-злаковыми ассоциациями сухих степей преобладают почвы каштанового типа. Убсу-Нурская котловина выделяется резкой континентальностью климата – низким атмосферным увлажнением и высокими тепловыми ресурсами лета: средняя годовая температура воздуха ($-1,9^{\circ}$), продолжительность безморозного периода – 169 дней и $\Sigma t_{\geq 10^{\circ}\text{C}}=2207^{\circ}$, которые создают режим полупустынной зоны с каштановыми почвами и псаммоземами.

Интерпретация выделения типологических единиц структурной и функциональной организации почвенного покрова степных котловин Хакасии представлена на основе статистического анализа совмещения границ и информационного содержания контуров почвенного покрова и температурных полей, полученных на основе анализа спутниковых данных дневных, ночных температур и разницы температур, полученных путем вычитания двух скомпилированных серий (рис. 3).

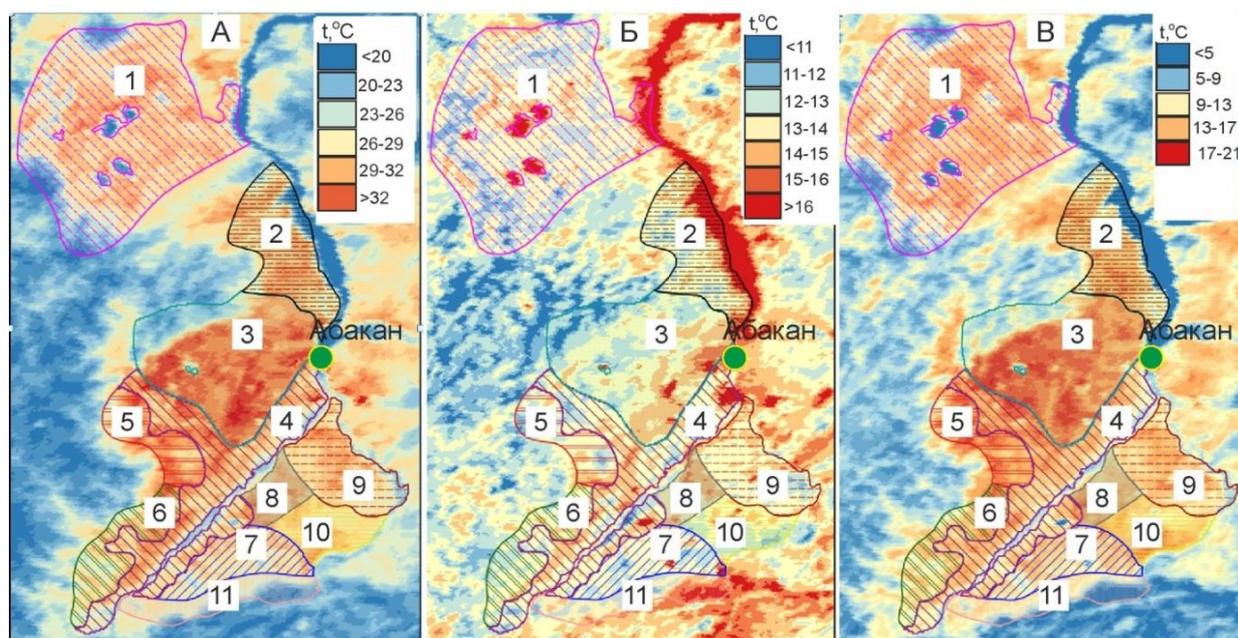


Рисунок 3. Картографические модели температурных полей почв степных котловин Хакасии, созданные на основе анализа спутниковых данных: А) – дневных, Б) – ночных и В) – разницы дневных и ночных температур, полученных путем вычитания двух скомпилированных серий. Обозначение котловин см. рис. 2.

Полученные картографические модели дают отчетливое представление о границах контуров температурных полей типологических единиц почвенного покрова Хакасии, функционирование которых осуществляется в широком диапазоне температур, как крупных единиц почвенного покрова, таких как Ширинская или Уйбатская котловины, так и занимающих небольшие площади – Койбальская или Сорокаозерная, но имеющих самостоятельное экологическое значение. Обращает на себя внимание значительная разница в выделении площадей почвенных контуров и их температурных полей в котловинах сухих (опустыненных) степей, полученных на основе анализа спутниковых данных, как дневных, так и ночных температур.

Пространственное распространение температурных полей степных котловин Тывы имеет юго-западное направление и обусловлено особенностями макрорельефа (рис. 4).

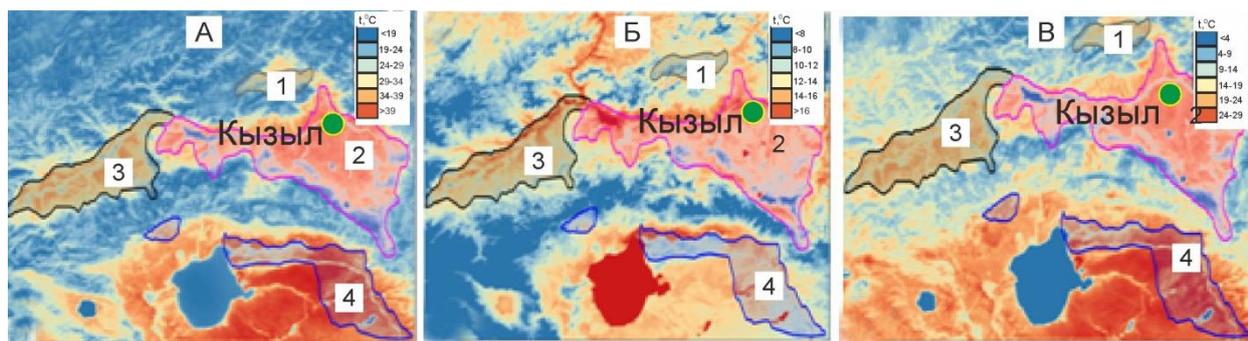


Рисунок 4. Картографические модели температурных полей почв степных котловин Тывы, созданные на основе анализа спутниковых данных: А) – дневных, Б) – ночных и В) – разницы дневных и ночных температур, полученных путем вычитания двух скомпилированных серий. Обозначение котловин см. рис. 2.

В котловинах Тывы, отличающихся аридизацией климата и высокой степенью разнообразия характеристик почвенного географического пространства, полученные картографические модели температурных полей могут быть использованы для выявления пространственных и временных градиентов термических ресурсов в масштабе крупных и локальных единиц почвенного покрова. По условиям теплообеспеченности и континентальности климата, которые создают режим полупустынной зоны с каштановыми почвами и псаммоземами, особенно выделяется Убсу-Нурская котловина с резкой континентальностью. Модели температурных полей дают возможность для получения дополнительной информации о природных комплексах, формирование и функционирование которых осуществляется в условиях ультравысоких или ультранизких значений температур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Картографические модели температурных полей, полученные в результате совместного анализа наземных и спутниковых данных, обладают достаточной информативностью в отношении энергетики почвообразовательных процессов и могут быть использованы для оценки термических условий почв малоисследованных и труднодоступных территорий Алтае-Саянского региона. Новизна подхода заключается в том, что картографические модели температурных полей почв, созданные на основе количественных показателей температурного режима, обладают достаточной информативностью, позволяющей устанавливать взаимосвязи с другими характеристиками объектов природной среды и подойти к решению проблемы выделения границ температурных полей типологических единиц почвенного покрова. Пространственное распространение температурных полей с учетом актуальных тенденций изменения термических ресурсов, может быть использовано для корректирования контурных границ структурных единиц почвенного покрова.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследования были выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700316-9).

ЛИТЕРАТУРА

Корсунов В.М., Красеха Е.Н., Ральдин Б.Б. Методология почвенно-географических исследований и картографии почв. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2002. 232 с.

Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С., Пестунов И.А., Безбородова А.Н., Курбатская С.С., Рылов С.А., Синявский Ю.Н. Применение данных дистанционного зондирования и наземного автоматизированного мониторинга температурных полей почв для картографического моделирования почвенного покрова // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. В 5-ти томах. Том III. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2018. С. 238–242. DOI: <https://doi.org/10.25680/1463.2018.67.60.243>.

Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Ермаков Н.Б., Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С. Анализ многолетней динамики температурного режима Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай) на основе данных LANDSAT //

Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023) [Электронный ресурс]. Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием (Бердск, 22–25 августа 2023 г.). Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. С. 294–304. DOI: <https://doi.org/10.25743/sdm.2023.57.96.050>.

Синявский Ю.Н., Пестунов И.А., Дубровская О.А., Рылов С.А., Мельников П.В., Ермаков Н.Б., Полякова М.А. Методы и технология сегментации мультиспектральных изображений высокого разрешения для исследования природных и антропогенных объектов // *Вычислительные технологии*. 2016. Т. 21. № 1. С. 127–140.

Синявский Ю.Н., Рылов С.А. Экспериментальное сравнение непараметрических алгоритмов кластеризации для сегментации мультиспектральных изображений // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018. Т. 1. № 4. С. 109–114.

Arrouays D., McBratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A., Morgan L., Roudier P., Poggio L., Mulder V. Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better // *Geoderma Regional*. 2020. Vol. 20. P. 1–7. E00255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>.

Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation // *Advances in Soil Science: part of the book series / B.A. Stewart (eds)*. New York: Springer, 1989. Vol. 9. P. 177–213. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_4.

Galve J., Sanchez J., Garcia-Santos V., Gonzalez-Piqueras J., Calera A., Villodre J. Assessment of Land Surface Temperature Estimates from Landsat 8-TIRS in A High-Contrast Semiarid Agroecosystem. Algorithms Intercomparison // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 8. P. 843. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14081843>.

McBratney A.B., Minasny B., Cattle S., Vervoort R. From Pedotransfer functions to soil inference systems // *Geoderma*. 2002. Vol. 109. Iss. 1–2. P. 41–73. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00139-8).

Minasny B., McBratney A.B. Digital Soil mapping: A brief history and some lessons // *Geoderma*. 2016. Vol. 264. P. 301–311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.

Pachepsky Ya.A., Rawls W.J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1999. Vol. 63. Iss. 6. P. 1748–1757. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361748x>.

Paradian J., Morris J., Minasny B., McBratney A.B. Pedotransfer Function and Soil Inference System // *Pedometrics*. 2018. P. 195–220. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-63439-5_7.

Sekertekin A., Bonafoni S. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 2. P. 294. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020294>.

Shein E.V., Arkhangel'skaya T.A. Pedotransfer functions: State of the art, problems, and outlooks // *Eurasian Soil Science*. 2006. Vol. 10. No. 10. P. 1089–1099. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229306100073>.

Поступила в редакцию 13.12.2023

Принята 17.04.2024

Опубликована 28.04.2024

Сведения об авторах:

Кудряшова Светлана Яковлевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); kudryashova@issa-siberia.ru

Чумбаев Александр Сергеевич – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); chumbaev@issa-siberia.ru

Курбатская Светлана Суруновна – доктор географических наук, заведующая лабораторией геоботаники и экологии почв ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (г. Кызыл, Россия); lane.kurbatskaya@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Cartographic models of soil temperature fields in the steppe basins of Khakassia and Tuva based on joint analysis of temperature monitoring ground and satellite data

© 2024 S. Ya. Kudryashova ¹, A. S. Chumbaev ¹, S. S. Kurbatskaya ²

¹Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: kudryashova@issa-siberia.ru; chumbaev@issa-siberia.ru

²Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of RAS, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Internatsionalnaya street 117A, Kyzyl, Russia. E-mail: lana.kurbatskaya@mail.ru

The aim of the study was to justify the possibility of using quantitative characteristics of the temperature regime of soils obtained by a joint analysis of ground-based and satellite monitoring to create cartographic models of typological units of soil-bioclimatic zonation of the Khakassia and Tuva steppe basins.

Location and time of the study. The development of methodology for identifying the temperature fields boundaries was carried out in 2019-2022, using as a case example the soil cover typological units in the Altai-Sayan region, including the diversity of steppes of the Chulym-Yenisei and Minusinsk troughs, the Turan-Uyuk, Central Tuva, and Ubsu-Nur basins. Key areas were selected taking into account the principles of landscape zoning, which make it possible to recognize, classify and map landscape-differentiating factors, landscape components, the regional landscape structure in their entirety and its dynamic features.

Methods. Ground-based automated monitoring of air and soil was performed using specialized temperature recorders DS-1921G “Thermochron”, taking into account indicators reflecting the genetic unity of climate types in the Altai-Sayan region. To carry out retrospective analysis, statistical processing and visualization of MODIS data, a software and algorithmic toolkit created by the Institute of Computational Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk) was used: the software is based on a new technology for accessing the satellite data archive, implemented using the PostgreSQL DBMS with an additional module, designed for direct access to the file data archive without the need to first copy and convert the data format for the DBMS.

Results. Based on a joint analysis of quantitative indicators of the air and soil temperature regimes, obtained using ground-based automated measuring systems and satellite data, a series of cartographic models were constructed: the latter reflect the temperature fields characteristics of typological units of soil-bioclimatic zonation of the Altai-Sayan region. The interpretation of the identification of typological units of the soil cover structure performed on the basis of a statistical analysis of the combination of boundaries and information content of the contours of the soil cover and the boundaries of temperature fields (day and night temperatures, as well as the difference in temperatures of two compiled series, calculated over a 16-year period). The novelty of the approach is based on the fact that cartographic models of temperature fields, constructed on the basis of quantitative temperature indicators, have information content sufficient for establishing relationships between the temperature regime and other characteristics of natural environmental objects, contributing to solving the problem of identifying and typologizing soil-ecological boundaries.

Conclusions. Cartographic models of temperature fields obtained as a result of a joint analysis of ground-based and satellite data are sufficiently informative regarding the energy of soil-forming processes and can be used to assess soil thermal conditions in the inaccessible and hence poorly studied areas of the Altai-Sayan region.

Keywords: steppe basins; soil temperature fields; cartographic modeling; ground-based and satellite monitoring.

How to cite: Kudryashova S.Ya., Chumbaev A.S., Kurbatskaya S.S. Cartographic models of temperature fields of soils in the steppe basins of Khakassia and Tuva based on a joint analysis of temperature monitoring of ground-based and satellite data. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(1). e240 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.240](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.240)

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 121031700316-9).

REFERENCES

- Korsunov V.M., Krasekha E.N., Raldin B.B. Methodology of soil-geographical research and soil cartography. Ulan-Ude: Publishing house BSC SB RAS, 2002. 232 p. (in Russian).
- Kudryashova S.Ya., Chumbaev A.S., Pestunov I.A., Bezborodova A.N., Kurbatskaya S.S., Rylov S.A., Sinyavsky Yu.N. Application of Remote Sensing Data and Ground Automated Monitoring of the Temperature Field of Soils for Cartographic Modeling of Soil Cover. In book: New methods and results of landscape research in Europe, Central Asia and Siberia. Vol. III. Moscow: D.N. Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, 2018. P. 238–242. DOI: <https://doi.org/10.25680/1463.2018.67.60.243>. (in Russian).

Mamash E.A., Pestunov I.A., Ermakov N.B., Kudryashova S.Ya., Chumbaev A.S. Analysis of the long-term dynamics of the temperature regime of the chuya intermountain basin (republic of Altai) based on landsat data. Processing of spatial data in problems of monitoring natural and anthropogenic processes (SDM-2023) [Electronic resource]. Collection of proceedings of the All-Russian conference with international participation (Berdsk, 22–25 August, 2023). Novosibirsk: FIC IVT, 2023. P. 294–304. DOI: <https://doi.org/10.25743/sdm.2023.57.96.050>. (in Russian).

Sinyavskiy Yu.N., Pestunov I.A., Dubrovskaya O.A., Rylov S.A., Melnikov P.V., Ermakov N.B., Polyakova M.A. Methods and technology for segmenting high-resolution multispectral images for the study of natural and anthropogenic objects. *Computational Technologies*. 2016. Vol. 21. No. 1. P. 127–140. (in Russian).

Sinyavsky Yu.N., Rylov S.A. Experimental comparison of nonparametric clustering algorithms for segmentation of multispectral images. *Interexpo Geo-Siberia*. 2018. Vol. 1. No. 4. P. 109–114. (in Russian).

Arrouays D., McBratney A., Bouma J., Libohova Z., Richer-de-Forges A., Morgan L., Roudier P., Poggio L., Mulder V. Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better. *Geoderma Regional*. 2020. Vol. 20. P. 1–7. E00255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>.

Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science: part of the book series / B.A. Stewart (eds)*. New York: Springer, 1989. Vol. 9. P. 177–213. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_4.

Galve J., Sanchez J., Garcia-Santos V., Gonzalez-Piqueras J., Calera A., Villodre J. Assessment of Land Surface Temperature Estimates from Landsat 8-TIRS in A High-Contrast Semiarid Agroecosystem. Algorithms Intercomparison. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 8. P. 843. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14081843>.

McBratney A.B., Minasny B., Cattle S., Vervoort R. From Pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*. 2002. Vol. 109. Iss. 1–2. P. 41–73. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00139-8).

Minasny B., McBratney A.B. Digital Soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*. 2016. Vol. 264. P. 301–311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017>.

Pachepsky Ya.A., Rawls W.J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1999. Vol. 63. Iss. 6. P. 1748–1757. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361748x>.

Paradian J., Morris J., Minasny B., McBratney A.B. Pedotransfer Function and Soil Inference System. *Pedometrics*. 2018. P. 195–220. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-63439-5_7.

Sekertekin A., Bonafoni S. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 2. P. 294. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020294>.

Shein E.V., Arkhangel'skaya T.A. Pedotransfer functions: State of the art, problems, and outlooks. *Eurasian Soil Science*. 2006. Vol. 10. No. 10. P. 1089–1099. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229306100073>.

Received 13 December 2023

Accepted 17 April 2023

Published 28 April 2024

About the authors:

Svetlana Ya. Kudryashova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil-Physical Processes in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); kudryashova@issa-siberia.ru

Alexander S. Chumbaev – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory in the Laboratory of Soil-Physical Processes in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); chumbaev@issa-siberia.ru

Svetlana S. Kurbatskaya – Doctor of Geographical Sciences, Head of the Laboratory of Geobotany and Soil Ecology, Tuvini Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of RAS, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Kyzyl, Russia); lanakurbatskaya@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under Creative Commons Attribution 4.0 License