

Л.С. ШАРАЯ\*, П.С. ВАН\*\*

\*Институт экологии Волжского бассейна РАН,  
445003, Тольятти, ул. Комзина, 10, Россия, l\_sharaya@mail.ru\*\*Объединенная дирекция государственных природных заповедников и национальных парков  
Хабаровского края «Заповедное Приамурье»,  
680038, Хабаровск, ул. Серышева, 60, Россия, vanpolina8710@mail.ru**ЗАКОНОМЕРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПОЧВ  
НА ТЕРРИТОРИИ ЗАКАЗНИКА «УДЫЛЬ» (НИЖНЕЕ ПРИАМУРЬЕ)**

*Проведены ландшафтно-экологические исследования на топологическом уровне в летний период 2014 и 2016–2017 гг. на территории федерального заказника «Удиль» — модельном полигоне Нижнего Приамурья. Заложено и комплексно описано 26 пробных площадей. На каждой пробной площади измерена температура почвы на различных глубинах. С целью выявления закономерностей изменения температуры почв на исследуемой территории для понимания взаимосвязей внутри геосистем региона был проведен анализ связей почвенных температур с факторами среды методом множественной регрессии, усовершенствованной для анализа экосистем. Пространственный анализ почвенных температур показал их зависимость от положения в ландшафтной катене, от близости озера, экспозиции склонов, форм рельефа. Построены регрессионные модели, описывающие изменения температур почв на различных глубинах с помощью характеристик рельефа. Модели характеризуются тесными связями, значения коэффициента детерминации  $R^2$  варьируются от 0,83 до 0,87. С помощью характеристик рельефа для изученной территории построена модель типов местоположений ( $R^2 = 0,85$ ). Показано, что на температуры приповерхностных слоев почв наибольшее влияние оказывает положение в катене, а на глубинные — расстояние от центра озера. На основе выявленных связей построены подробные карты-матрицы температур и типов местоположений с ячейками-элементами  $50 \times 50$  м, которые могут использоваться для расчета карт-матриц характеристик почвенного и растительного покровов. Показано, что использование рельефа, который представляет собой перераспределитель света, тепла, влаги и литодинамических потоков, дает выраженный эффект в моделях почвенных температур. Выявление тесных связей абиотических характеристик с рельефом открывает возможность для обоснованного расчета карт биотических характеристик, в противоположность расчету методами простой интерполяции измеренных данных.*

**Ключевые слова:** пространственное моделирование, геоморфометрия, морфометрические величины, множественная регрессия, катена, кривизна.

L.S. SHARAYA\*, P.S. VAN\*\*

\*Institute of Ecology of the Volga River Basin, Russian Academy of Sciences,  
445003, Tolyatti, ul. Komzina, 10, Russia, l\_sharaya@mail.ru\*\*Centralized Directorate of State Nature Reserves and National Parks of Khabarovsk Krai  
“Zapovednoe Priamurie”, 680038, Khabarovsk, ul. Serysheva, 60, Russia, vanpolina8710@mail.ru**REGULAR CHANGES IN SOIL TEMPERATURES ON THE TERRITORY  
OF THE UDYL' WILDLIFE RESERVE (LOWER AMUR REGION)**

*Landscape-ecological investigations were made at the topological level in the summer period of 2014 and 2016–2017 on the territory of the Udyl' federal wildlife reserve, a model study area of the Lower Amur region. Twenty-six trial areas were established and described in detail. Soil temperature was measured at different depths in each trial state. To identify the regularities in soil temperature changes on the territory under study for understanding the interdependencies within the region's geosystems, an analysis was made of the relationships between soil temperatures and environmental factors by using the method of multiple regression that was improved for ecosystem analysis. Spatial analysis of soil temperatures showed their dependence on the position in the landscape catena, the vicinity of the lake, slope exposure of the slope and on landforms. Regression models were constructed which describe soil temperature changes at different depths using topographic attributes. The models are characterized by close statistical relationships. The coefficients of determination  $R^2$  varied from 0,83 to 0,87. The characteristics of the relief of the study territory were used to construct the model of the types of position ( $R^2 = 0,85$ ). It was shown that surface soil layer temperatures are influenced the most by the position in the catena, and the temperatures at depths depend on the*

*distance from the lake center. The identified relationships were used as the basis to construct detailed raster maps with cells of 50 × 50 square meters. They can be used to calculate soil and vegetation cover gridded maps. It was shown that the use of topography, which is a redistributor of light, heat, moisture, and lithodynamic flows, provides a clearly pronounced effect in soil temperature models. Identification of close relationships between abiotic features and topography enables reliable maps of biotic characteristics, in contrast to simple interpolation of measured data.*

**Keywords:** *spatial modeling, geomorphometry, morphometric values multiple regression, catena, curvature.*

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования ландшафтов Нижнего Приамурья в основном посвящены их типизации и проводятся на региональном уровне [1], что имеет важное инвентаризационное значение. Закономерности их структурно-функциональной организации, которые лучше всего познаются на топологическом уровне [2], остаются малоизученными [3, 4].

Изменение температурного поля рассматривается в качестве ведущего фактора структурно-функциональной организации почвенного и растительного покрова [5, 6]. С другой стороны, показано, что влажность почв и содержание в них органического вещества оказывают значимое влияние на температурный режим [7]. Например, для сохранения низких температур в многолетнемерзлых породах важны органическое вещество почв и напочвенного покрова [8]; это явление даже получило известность как «экологическая защита вечной мерзлоты» [9]. За рубежом матрицы факторов среды нередко рассчитывают заранее. Их делают доступными для дальнейшего использования в анализе пространственного распределения растительности [10].

Целью настоящего исследования было выявление закономерностей изменения температуры почв на территории заказника «Удыль» в Нижнем Приамурье для понимания взаимосвязей внутри геосистем региона. На основе выявленных связей предполагается провести расчет подробных матриц температур почв, которые могут быть использованы в анализе пространственной организации растительных сообществ и получении карт-матриц.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Объект исследования — заказник федерального значения «Удыль» — находится на территории Нижнеамурской области, включающей в себя единственную одноименную ландшафтную провинцию, и входит в состав Амурско-Приморской физико-географической страны [11]. С севера область ограничена южным берегом Охотского моря и долиной р. Амур на юге. Восточной границей служат берега Сахалинского залива и Амурского лимана. Западная граница проходит по Буреинскому нагорью (рис. 1).

Для рельефа территории характерно чередование низко- и среднегорных коротких хребтов, покрытых хвойными и хвойно-широколиственными лесами, и межгорных депрессий с заболоченными днищами, часто занятыми крупными и мелководными озерами. Климат области имеет муссонные черты [3]. Основные зональные ландшафты Нижнеамурской области бореальные средне- и южно-таежные (полигон заказника «Удыль»). На юге области фрагментарно представлены притихоокеанские суббореальные гумидные широколиственно-лесные ландшафты (полигон заповедника «Комсомольский») [12].

Заказник «Удыль» расположен в северо-восточной части Нижнеамурской области, в северо-западной части Удыль-Кизинской низменности. Рельеф территории преимущественно озерно-аллювиальный низменный, частично низкогорный (высота от 5 до 476 м над ур. моря). Низменная часть территории заказника покрыта верховыми болотами и осоково-вейниковыми лугами на торфяно-глееземах, луговых и аллювиальных почвах. Низкогорную часть территории (18 % площади заказника) покрывают лиственничные и коренные елово-пихтовые леса, а также производные от них березовые и осиновые леса на буроземах и буроземах грубогумусовых. В центре заказника располагается пресноводное оз. Удыль, занимающее 25 % его площади. Озеро ограничено низкими заболоченными берегами с юга и обрывистыми высокими с северо-востока и юго-востока.

В летний период 2014, 2016 и 2017 гг. на территории заказника «Удыль» были проведены ландшафтно-экологические исследования с закладкой 26 комплексных пробных площадей (20 × 20 м) в различных типах местоположений — геотопах, образующих систему местных ландшафтных сопряжений: от элювиальных до супераквальных. На пробных площадях описывался почвенный профиль, геоботаническая площадь, собирались данные по продуктивности растительных сообществ. Измерение

температуры почвы проводилось летом 2017 г. на фиксированных глубинах от 30 до 70 см через каждые 10 см ртутным термометром.

Связи почвенных температур с факторами среды выявлялись методом множественной регрессии, усовершенствованным для анализа экосистем [13]. В методе используется модель с четырьмя предикторами, и объективный выбор наиболее значимых предикторов осуществляется путем перебора всех комбинаций из данных предикторов, для которых выполнялся критерий линейной независимости (максимум фактора «вспухания» дисперсии  $\leq 5,15$ ); отбиралась та комбинация предикторов, для которой найден наибольший коэффициент детерминации. Таким образом, решалась методическая задача, состоящая в том, чтобы в полученной модели влиятельные факторы не зависели от предпочтений авторов. Проверку или верификацию моделей проводили по методу кросс-валидации Аллена с использованием эмпирического критерия  $Degr < 50 \%$  [13], выполнение которого было необходимо для расчета карт по моделям. В уравнениях предикторы располагаются в порядке снижения их статистической значимости. Для расчета моделей и построения карт использовалась авторская программа П.А. Шарого «Аналитическая ГИС Эко» [14].

В качестве характеристик рельефа применялась система 18 основных морфометрических величин (МВ) [15], а также характеристики освещенности при разных азимутах, экспозиций, расстояния по разным географическим направлениям. Для учета нелинейных связей использовали центрированные квадраты характеристик. В качестве предикторов брали также значения влажности, механического состава почв и сомкнутости. Все МВ рассчитывались по цифровой модели рельефа, полученной из данных проекта НАСА SRTM [16], преобразованной в матрицу высот земной поверхности в проекции Меркатора UTM (северное полушарие, зона 54) с разрешением 50 м. МВ, обработанные специальным образом для анализа [13], помечались верхним индексом П.

Для оценки светового и теплового режимов геосистем использовались освещенность и экспозиция склонов. Относительная освещенность склонов  $F_0(a,b)$  — это перпендикулярность падения солнечных

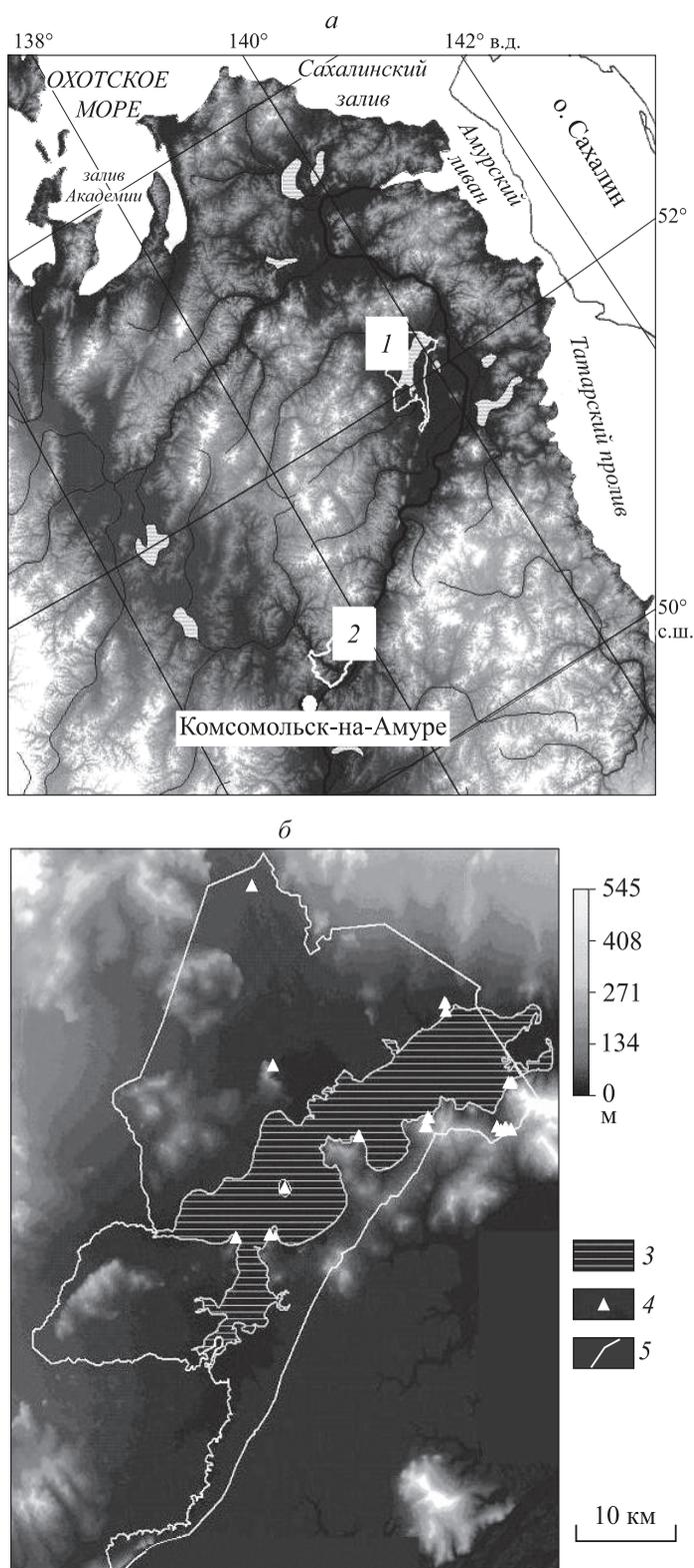


Рис. 1. Расположение заказника «Удиль» и заповедника «Комсомольский» в Нижнем Приамурье (а), заказник «Удиль» с площадками исследования (б).

1 — заказник «Удиль»; 2 — заповедник «Комсомольский»; 3 — оз. Удиль; 4 — площадки исследования; 5 — граница заказника.

лучей на земную поверхность, которая зависит от двух углов: склонения Солнца над горизонтом  $a$  и азимута Солнца  $b$  [17]. Ее можно выражать в процентах (100 % для перпендикулярного падения лучей и 0 % — для теневых склонов) или в единицах энергии по формуле  $F(a,b) = \tau F_0(a,b)/100$ , где  $\tau = 1250 \text{ Вт/м}^2$  — солнечная постоянная на уровне моря, а  $F_0(a,b)$  — освещенность в процентах. Угол  $a$  выбран равным  $35^\circ$ , а угол  $b$  подбирали так, чтобы он отвечал максимально тесной связи с изучаемым свойством фитоценоза. Из-за цикличности экспозиции склонов  $A_0$  ( $0^\circ$  и  $360^\circ$  — одно и то же) в статистическом анализе нельзя использовать ее выражение непосредственно, поэтому ее преобразовывали в нециклические функции от  $A_0$ , а именно  $\sin A_0$ ,  $\cos A_0$ ,  $\sin A_{45}$  и  $\cos A_{45}$ , где  $A_{45} = A_0 + 45^\circ$  [18]. На основании статистических сравнений выбирали ту из них, для которой связь с изучаемым свойством фитоценоза была наиболее тесной. Влияние экспозиции крутых и пологих склонов на данный показатель учитывалось с помощью произведения или частного функции на крутизну  $GA$  (например,  $GA \times \cos A_0$  или  $\cos A_0/GA$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Расчет модели типов местоположений.** Система типов местоположений (*МПЛ*) считается базой для пространственной дифференциации лесных экосистем, включая их гидротермические условия [17, 19, 20]. У нас была возможность, сравнивая выявленные в полевых условиях типы местоположений на картографически привязанных площадках с рельефом, построить следующую модель:

$$\ln \text{МПЛ} = -0,004917 \cdot Z - 0,3229 \cdot kmin^{\text{II}} + 1,892 \cdot 10^{-5} \cdot Z^2 - 0,4876 \cdot M^{\text{II}} + 1,312;$$

$$R^2 = 0,854 \text{ (Degr} = 6,48 \%), P < 10^{-6}, \quad (1)$$

где *МПЛ* — тип местоположения,  $Z$  — высота,  $kmin$  — минимальная кривизна и  $M$  — несферичность. Типы ранжированы в баллах: 1 — элювиальный, трансэлювиальный ( $\mathcal{E}$ ,  $T\mathcal{E}$ ), 2 — трансаккумулятивный ( $TA$ ), 3 — аккумулятивный ( $A$ ) и 4 — супераккумулятивный ( $CA$ ). Поскольку *МПЛ* представляет собой

дискретную переменную, то в статистических сравнениях от нее следует брать логарифм. Три предиктора со знаком «минус» — высота  $Z$ , минимальная кривизна  $kmin$  и несферичность  $M$  — описывают возрастание значений *МПЛ* при снижении высоты, на тальвегах и в вытянутых долинах и оврагах. Третий предиктор — квадрат высоты  $Z^2$  со знаком «плюс» — указывает на то, что тенденция роста значений *МПЛ* со снижением высоты может нарушаться, и тогда  $\mathcal{E}$ ,  $T\mathcal{E}$  могут располагаться на высотах меньших, чем  $TA$  и  $A$ . Это следствие того, что изучаемая выборка была рандомизованной стратифицированной, площадки с разными типами местоположений располагались не на одной трансекте, а по всей территории, чтобы максимально охватить разнообразие растительного покрова. Модель (1) успешно прошла верификацию, имеет низкий показатель деградации (6,48 %), что позволяет рассчитать по ней карту *МПЛ* (рис. 2, а).

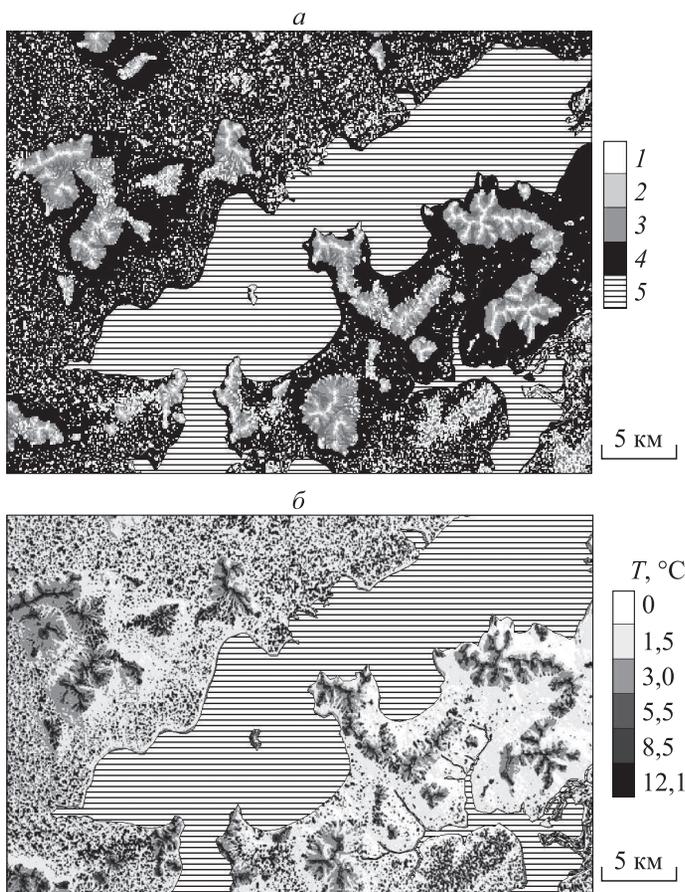


Рис. 2. Карты-схемы типов местоположений (а) и температур почв на глубине 40 см (б) на территории заказника.

Типы местоположений: 1 — элювиальный и трансэлювиальный, 2 — трансаккумулятивный, 3 — аккумулятивный, 4 — супераккумулятивный, 5 — водная поверхность.

**Расчет моделей почвенных температур.** Диапазон изменения почвенных температур в заказнике составляет 13,5 °С на глубине 30 см ( $T_{30}$ ) и 10,0 °С на глубине 70 см ( $T_{70}$ ); средние значения для всей выборки составляли 9,5 °С для  $T_{30}$  и 6,2 °С для  $T_{70}$ . Коэффициент вариации почвенных температур возрастает с глубиной от 39,9 до 56,6 %. Разность температур по почвенному профилю от 30 до 70 см варьировала от 1,2 до 5,6 °С; средний перепад температур с глубиной по выборке составил 3,4 °С.

Почвенные температуры изучаемого участка характеризуются заметными парными связями с МВ (коэффициент корреляции  $r$  от  $-0,50$  до  $-0,67$  и от  $+0,48$  до  $+0,62$ ). В таблице приведены средние значения почвенных температур на глубинах 30 и 70 см, относящиеся к двум количественным диапазонам внешних условий. Также приведены отношения значений температур, отвечающие изменению этих двух диапазонов. Из всего ряда рассматриваемых факторов выбраны те, для которых отношения значений в разных диапазонах равны 2 или больше. Из таблицы видно, что на хорошо выраженных средневыпуклых формах рельефа, описываемых средней кривизной ( $H > +0,3$ ),  $T_{70}$  на глубине 70 см почти в три раза выше, чем на хорошо выраженных средневогнутых ( $H < -0,3$ ). На склонах, наибольшим образом ориентированных на север ( $\cos A_0 > +0,5$ ),  $T_{70}$  меньше в два раза, чем на ориентированных на юг ( $\cos A_0 < -0,5$ ). Выраженные в рельефе выпуклые в профиле склоны ( $kv < +0,3$ ) характеризуются средней температурой  $T_{70}$  в 4,1 раза выше, чем на вогнутых в профиле ( $kv < -0,3$ ). Средние температуры для элювиальных и супераквальных местоположений различаются в 3,3 раза для слоя 70 см и в 2,4 раза для слоя 30 см. Средняя температура на гребневых формах в 2,4 раза выше, чем на иных. Хотя значения температур снижаются с глубиной, отношения их средних значений существенно выше на глубине 70 см, что отвечает лучшему поддержанию температурных контрастов в нижележащих слоях почвы.

**Средние значения температур почв на глубине 30 см ( $T_{30}$ ) и 70 см ( $T_{70}$ ) и их отношения, отвечающие разным диапазонам значений факторов среды**

Фактор среды	Диапазоны значений	Средние значения температур почв			
		$T_{30}$	отношение	$T_{70}$	отношение
$X$ , км	<10	7,6	1,6	4,3	2,0
	>10	12,0		8,6	
$V_l$	< $V_{l_{CP}}$	12,0	1,3	7,5	2,0
	> $V_{l_{CP}}$	8,9		3,8	
$\cos A_0$	>+0,5	7,7	1,7	4,2	2,2
	<-0,5	12,8		9,3	
$k_{max}$	<0	5,4	1,9	2,8	2,4
	>0	10,3		6,8	
МПЛ	$\mathcal{E}$ , $T\mathcal{E}$	12,2	2,8	8,6	3,3
	$CA$	4,4		2,6	
$TI$	< $TI_{CP}$	12,2	1,8	8,8	2,0
	> $TI_{CP}$	7,7		4,4	
$SPI$	< $SPI_{CP}$	11,7	1,6	8,1	1,9
	> $SPI_{CP}$	7,5		4,3	
$\sin A_{45}$	>0,5	7,8	1,6	4,6	2,0
	<0,5	12,9		9,4	
$H$	<-0,3	5,5	2,1	2,7	2,9
	>+0,3	11,3		7,9	
$kv$	<-0,4	4,9	2,4	2,1	4,1
	>+0,4	11,6		8,4	

**Примечание.** Факторы среды:  $X$  — расстояние до меридиана, проходящего через центр оз. Удиль;  $TI$  — топографический индекс влажности (характеристика рельефа);  $V_l$  — измеренная влажность почвы (для  $T_{30}$  рассматривается влажность горизонта A1, для  $T_{70}$  — горизонта C),  $V_{l_{CP}}$  — среднее значение по выборке;  $SPI$  — индекс мощности потоков (характеристика рельефа);  $\cos A_0$  — северность склонов ( $\cos A_0 > +0,5$ , включает склоны, отвечающие наибольшей ориентации на север; склоны, характеризующиеся  $\cos A_0 < -0,5$  отвечают наибольшей ориентации на юг);  $\sin A_{45}$  — северо-восточность склонов (диапазоны рассмотренных значений аналогичны  $\cos A_0$ );  $k_{max}$  — со знаком «плюс» описывает гребневые формы ( $k_{max} > 0$  отвечает вершинам гребней и областям, близким к ним), со знаком «минус» — прочие формы вне гребней;  $H$  — средняя кривизна со знаком «минус» описывает средневогнутые формы ( $H < -0,3$  отвечает хорошо выраженным вогнутым формам), со знаком «плюс» — средневыпуклые; МПЛ — типы местоположения ( $\mathcal{E}$ ,  $T\mathcal{E}$  — элювиальные и трансэлювиальные,  $CA$  — супераквальные);  $kv$  — со знаком «минус» описывает вогнутые в профиле склоны, которые замедляют потоки, со знаком «плюс» — выпуклые ускоряющие потоки.

Модель множественной регрессии для температуры на глубине 40 см ( $T_{40}$ ) следующая:

$$T_{40} = -5,297 \ln МПЛ + 2,518 \cdot 10^{-8} \cdot X^2 - 0,2673 \cdot GA \cdot \sin A_{45} - 1,091 \cdot kv^{\Pi} + 9,940;$$

$$R^2 = 0,869 \text{ (Degr} = 7,8 \%), P < 10^{-6}, \quad (2)$$

где  $X^2$  — центрированный квадрат расстояния от центра оз. Удьяль  $(X - X_{CP})^2$ , предиктор  $GA \cdot \sin A_{45}$  описывает влияние северо-восточного компонента экспозиции крутых склонов,  $kv$  — вертикальная кривизна. Первые три предиктора характеризуют снижение  $T_{40}$  при движении сверху вниз по ландшафтной катене ( $-МПЛ$ ), при движении к озеру по координате  $X(+X^2)$  и на крутых северо-восточных склонах ( $-GA \cdot \sin A_{45}$ ). Последнее означает увеличение  $T_{40}$  на противоположных — юго-западных — склонах. Четвертый предиктор в уравнении (2),  $kv$ , статистически незначим. Он несколько увеличивает коэффициент детерминации, однако верить его знаку нельзя. Связь  $T_{40}$  с характеристиками рельефа достаточно тесная ( $R^2 = 0,869$ ), показатель деградации в модели — низкий ( $Degr = 7,8 \%$ ), по уравнению может быть рассчитана карта (см. рис. 2, б).

Модели, описывающие  $T_{30}$  и  $T_{50}$ , также характеризуются тесной связью ( $R^2 = 0,842$  и  $0,825$  соответственно), отличаются от модели (2) статистически незначимыми четвертыми предикторами и значениями регрессионных коэффициентов. Отметим, что для  $T_{50}$  предиктор, описывающий крутые северо-восточные склоны, заменяется освещенностью с юго-запада. Такое замещение может объясняться тем, что на глубине 50 см почва может в большей степени сохранять следы прогрева поверхности под влиянием освещенности, которая определяет одновременно экспозицию склонов и перпендикулярность падения лучей, существенную не только для свето-, но и для терморезима.

Модель температуры почв на глубине 60 см следующая:

$$T_{60} = 2,558 \cdot 10^{-8} \cdot X^2 - 2,998 \ln МПЛ - 1,838 \sin A_{45} - 0,8426 E^{\Pi} + 6,673;$$

$$R^2 = 0,828 \text{ (Degr} = 8,4 \%), P < 10^{-6}, \quad (3)$$

в которой первые два предиктора рассмотрены в уравнении (2), третий — северо-восточная экспозиция всех (крутых и некрутых) склонов и последний предиктор — разностная кривизна  $E$ , описывающая со знаком «минус» зоны, где преобладает второй (действующий в профиле) механизм аккумуляции за счет вогнутых в профиле склонов [16]. Модель (3) отличается от моделей верхних слоев заменой первого предиктора вторым в (2). Здесь с глубиной расстояние от озера становится наиболее влиятельным фактором.

Координата  $X$  описывает расстояние от западной границы изучаемого участка в метрах и отвечает долготной координате, выраженной в метрах, используемой нами проекции УТМ для зоны 54. Центрирование этого расстояния  $(X - X_{CP})$  проводим для того, чтобы уравнение не содержало больших регрессионных коэффициентов. Поскольку меридиан  $X_{CP}$  попадает на середину озера, положительная связь с  $(X - X_{CP})^2$  означает, что на изучаемых площадках по мере удаления от центра водоема почвенные температуры закономерно растут. Наиболее сильное влияние этого фактора наблюдается в почве на глубине 60 и 70 см. Снижение температуры почв при приближении к водоему может объясняться наличием многолетнемерзлых пород (ММП) на дне озера (площадь озера около 340 км<sup>2</sup>), поскольку изучаемый участок находится в зоне островковой вечной мерзлоты, а, как известно, она лучше сохраняется под слоем воды [21]. Модели  $T_{60}$  и  $T_{70}$  отличаются наименее значимыми четвертыми предикторами и значениями регрессионных коэффициентов.

Сравнение значений измеренных и рассчитанных по моделям (2) и (3) температур приведено на рис. 3.

Отметим, что для температуры почв на полигоне заповедника «Комсомольский» с более выраженными горными хребтами, расположенного в Нижнем Приамурье (на ~600 км южнее), зависимость от  $МПЛ$  противоположная [4]. На изучаемой территории заказника при движении вниз по ландшафтной катене температура почвы падает из-за возрастающего влияния ММП, которая залегает на менее крутых низменных участках. В заповеднике наблюдается увеличение температуры почв в этом же направлении. Явление может объясняться «охлаждающим эффектом» близко расположенных горных пород на склонах с маломощными почвами в элювиальных и трансэлювиальных местоположениях.

Более высокие температуры почвы в заказнике «Удьяль» чаще фиксируются на юго-западных склонах, что связано с запаздыванием нагрева почвы на несколько десятков сантиметров из-за инерции проникновения тепла вглубь. Такое явление характерно для всего Северного полушария и отмечено на исследовательских полигонах Волжского бассейна [17, 20]. Максимальные температуры почвы на юго-западных склонах также отмечались на территории заповедника «Комсомольский» [22]. При этом

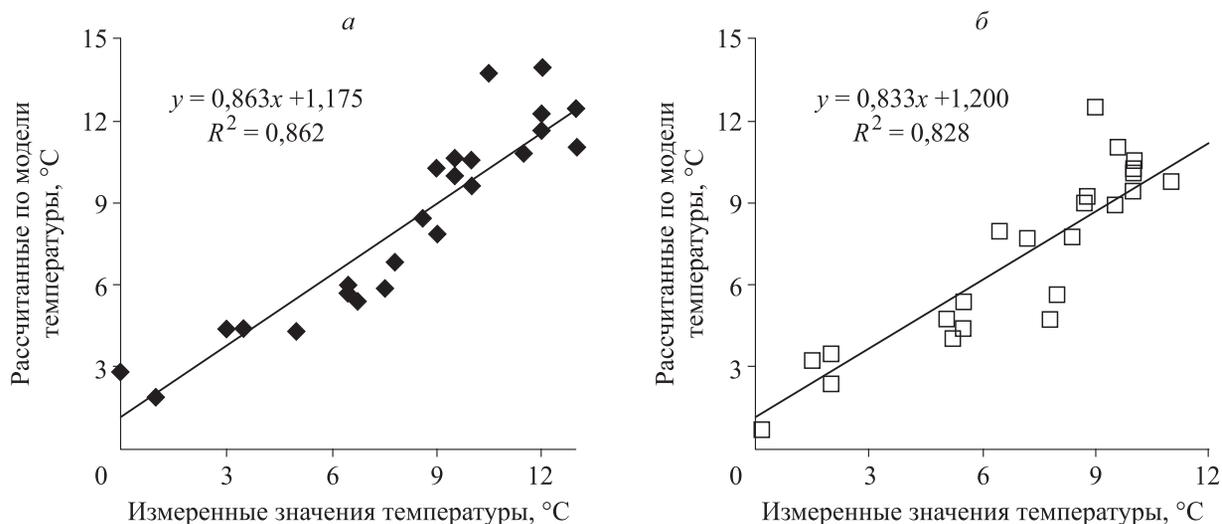


Рис. 3. Сравнение измеренных и рассчитанных по моделям (2) и (3) почвенных температур на глубине 40 (а) и 60 см (б).

для приповерхностных слоев важна крутизна юго-западных склонов. С глубиной влияние крутизны на температуру почвы уменьшается, а воздействие освещенности с указанного азимута может сохраняться.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные нами результаты показывают, что температуры почв на территории заказника «Удиль», в первую очередь, следуют изменению положения в катене и расстоянию от крупного водного объекта — оз. Удиль. При этом для температур верхних слоев почвы наиболее значимый предиктор — это положение в катене, для нижних — удаленность от центра озера. Третий важный предиктор — это экспозиция склонов: чем она ближе к юго-западной, тем выше температура. На температуры почвы разных слоев также влияют характеристики форм рельефа и потоков, например, топографический индекс влажности, индекс мощности потоков и др. Изменение температурного поля в заказнике надежно описывается регрессионными моделями, построенными с использованием характеристик рельефа. Полученные модели успешно прошли верификацию по принятым критериям. Учет расширенного спектра характеристик рельефа объясняет более 80 % изменения почвенных температур (коэффициенты детерминации  $R^2$  от 0,83 до 0,87 для моделей (2) и (3)). На другие действующие факторы приходится менее 20 %. Почему это так? Ответ, возможно, кроется и в определении классиков, считавших, что рельеф является перераспределителем света, тепла, влаги и литодинамических потоков [23]. Из этого следует, что если мы имеем многостороннее описание рельефа, то получаем надежную основу для описания перераспределения этих важных факторов.

Отметим, что в анализе почвенных температур мы не учитывали таксоны почв, типы растительных сообществ, но перераспределение света, тепла и влаги рельефом может оказывать одновременное влияние на свойства почв и растительности, вызывая их согласованное изменение. Некоторые авторы рассматривают неоднородность температурного поля в качестве ведущего фактора структурно-функциональной организации почвенного покрова [5, 6].

Свойства экосистем в полевых условиях могут быть измерены на десятках, реже — на сотнях площадок, а данные о рельефе сегодня доступны из подробных матриц высот земной поверхности. Выявление тесных связей абиотических характеристик с рельефом открывает возможность для обоснованного расчета карт биотических характеристик, в противоположность расчету методами простой интерполяции измеренных данных. Когда на изучаемой территории нет возможности использовать климат из-за малых его изменений, тогда модели и карты пространственных изменений температур могут служить основой для расчета обоснованных матриц и карт растительности. Например, исследователи в Австралии заготавливают заранее матрицы факторов среды для изучения пространственных закономерностей и расчета карт растительного покрова [10].

В работе показано, что закономерные изменения температуры почв на территории заказника могут быть выявлены посредством сравнения измеренной температуры с характеристиками рельефа.

Знание таких закономерностей важно не только для понимания согласования компонентов геосистем, но и для проведения прогнозных оценок в условиях глобального изменения климата. Расчеты вероятностных карт почвенных температур на основе обнаруженных тесных статистических связей с рельефом более обоснованы, чем рассчитанные путем интерполяции и экстраполяции измеренных данных. Рассчитанные нами карты дают узор распределения температуры, отражающий выявленные нами закономерности. Отметим, что сезонное изменение температуры воздуха, от которой зависима температура почвы, не способно привести к существенному изменению характера узора, оно лишь влияет на его контрастность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климина Е.М. Ландшафтно-картографическое обеспечение территориального планирования (на примере Хабаровского края). — Владивосток: Дальнаука, 2007. — 132 с.
2. Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. — Новосибирск: Наука, 1979. — 232 с.
3. Никонов В.И. Природные ландшафты Нижнего Приамурья // Сиб. геогр. сб. — 1975. — № 10. — С. 128–175.
4. Петренко П.С. Особенности ландшафтной структуры заповедника «Комсомольский» // Вестн. ДВО РАН. — 2018. — № 2. — С. 95–100.
5. Архангельская Т.А. Параметризация и математическое моделирование зависимости температуропроводности почвы от влажности // Почвоведение. — 2009. — № 2. — С. 178–188.
6. Malone B., Jha S., Minasny B., McBratney A.B. Comparing regression-based digital soil mapping and multi-point geostatistics for the spatial extrapolation of soil data // Geoderma. — 2016. — Vol. 262. — P. 243–253.
7. Arkhangelskaya T.A. Diversity of thermal conditions within the paleocryogenic soil complexes of the East European Plain: The discussion of key factors and mathematical modeling // Geoderma. — 2014. — Vol. 213. — P. 608–616.
8. Yi S., Woo M., Arain M.A. Impacts of peat and vegetation on permafrost degradation under climate warming // Geophysical Research Letters. — 2007. — Vol. 34. — P. L16504.
9. Hugelius G., Virtanen T., Kaverin D., Pastukhov A., Rivkin F., Marchenko S., Romanovsky V., Kuhry P. High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic // Journ. of Geophysical Research. — 2011. — Vol. 116. — P. G03024.
10. Ferrier S., Watson G., Pearce J., Drielsma M. Extended statistical approaches to modelling spatial pattern in biodiversity in northeast New South Wales. I. Species-level modelling // Biodiversity and Conservation. — 2002. — Vol. 11. — P. 2275–2307.
11. Криволуцкий А.Е. Амурско-Приморская страна // Физико-географическое районирование СССР: характеристика региональных единиц. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968. — С. 503–542.
12. Исаченко А.Г. Ландшафты СССР. — Л., 1985. — 320 с.
13. Шарый П.А., Пинский Д.Л. Статистическая оценка связи пространственной изменчивости содержания органического углерода в серой лесной почве с плотностью, концентрацией металлов и рельефом // Почвоведение. — 2013. — № 11. — С. 1344–1356.
14. Wood J. Overview of software packages used in geomorphometry // Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science. — 2009. — Vol. 33, Ch. 10. — P. 257–267.
15. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. — 2002. — Vol. 107. — P. 1–32.
16. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. — Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 2005. — 143 p.
17. Шарая Л.С., Шарый П.А. Изучение пространственной организации лесных экосистем с помощью методов геоморфометрии // Экология. — 2011. — № 1. — С. 3–10.
18. Шарый П.А., Смирнов Н.С. Механизмы влияния солнечной радиации и анизотропии местности на растительность темнохвойных лесов Печоро-Ильчского заповедника // Экология. — 2013. — № 1. — С. 11–19.
19. Коломыц Э.Г. Бореальный экотон и географическая зональность: Атлас-монография. — М.: Наука, 2005. — 390 с.
20. Шарая Л.С., Шарый П.А. Связь абиотических и биотических характеристик лесной экосистемы Жигули // Изв. Самар. науч. центра РАН. — 2009. — Т. 11, № 1. — С. 22–30.
21. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A. Thermal state of permafrost in Russia // Permafrost and Periglacial Processes. — 2010. — Vol. 21. — P. 136–155.
22. Петренко П.С. Пространственная организация лесных топогеосистем Нижнего Приамурья (на примере заповедника «Комсомольский») // География и природ. ресурсы. — 2017. — № 3. — С. 36–45.
23. Неуструев С.С. Элементы географии почв // Генезис и география почв. — М.: Наука, 1977. — С. 149–314.

*Поступила в редакцию 02.09.2019*

*После доработки 20.02.2020*

*Принята к публикации 25.12.2020*