

УДК 911.2+913

ЗАКОНОМЕРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ В ХВОЙНЫХ ЛЕСАХ ЗАКАЗНИКА “УДЫЛЬ” НИЖНЕГО ПРИАМУРЬЯ

© 2022 г. Л. С. Шарая^а*, П. С. Ван^б

^аСамарский федеральный исследовательский центр, Институт экологии Волжского бассейна РАН,
ул. Комзина, д. 10, Тольятти, 445003 Россия

^бФГБУ “Заповедное Приамурье”, ул. Серышева, д. 60, Хабаровск, 680038 Россия

*E-mail: l_sharaya@mail.ru

Поступила в редакцию 04.10.2020 г.

После доработки 19.07.2021 г.

Принята к публикации 01.12.2021 г.

В низкогорной части заказника “Удыль” с лиственничными и елово-пихтовыми лесами проведены ландшафтно-экологические исследования на 25 пробных площадках. С целью поиска закономерностей изменения в пространстве собраны данные по влажности и температурам почв, характеристикам фитоценозов. Здесь мы приводим результаты анализа по почвенной влажности. Сравнение влажности почв с характеристиками рельефа методом множественной регрессии показало, что от 59 до 78% дисперсии влажности объясняется рельефом. Изменение влажности зависит от положения в катене, удаленности берега Охотского моря, от характеризующих особенности потоков кривизн. Объясненная изменчивость влажности возрастает от 73 до 82%, если в качестве предикторов пространственной изменчивости, помимо характеристик рельефа, дополнительно использовать температуры почв, гранулометрический состав и характеристики групп фитоценозов. Однако успешная верификация моделей, основанных только на характеристиках рельефа, позволяет получить матрицы влажности почв, которые могут быть использованы для расчета вероятностных карт характеристик фитоценозов.

Ключевые слова: влажность почв, пространственное моделирование, рельеф, множественная регрессия.

DOI: 10.31857/S0024114822020085

Ландшафты Нижнего Приамурья в основном исследуются на региональном уровне с целью их дальнейшей типизации (Никонов, 1975; Климина, 2007). Однако изучению их структурно-функциональных особенностей, которые лучше всего раскрываются на топологическом уровне (Крауклис, 1979), пока уделяется немного внимания (Петренко, 2017). Влажность почвы относится к факторам, напрямую воздействующим на флористическую и фитоценотическую структуру растительности и ее продуктивность (Раменский, 1971; Коломыц, 2010). Основной пропускной канал связей с климатом проходит здесь через влажность почвы, являясь, с одной стороны, геофизическим индикатором состояния геосистемы, с другой – может рассматриваться как один из ведущих факторов, определяющих ландшафтную организацию (Коломыц, 2010).

Показано, что рост, структура и продуктивность растительности связаны с влажностью почв (McLaughlin et al., 2017), изменение ее вследствие глобального потепления оценено как важное для изменения растительного покрова. При этом на крупных и средних масштабах рельеф играет зна-

чительную роль, поскольку собирающие воду части склонов создают убежища, где чувствительность экосистем к потеплению меньше, чем в других частях (Hoylman et al., 2019). Это открывает возможности оценки климатической адаптации растительности (Morelli et al., 2016). В Западной Европе предпринимаются попытки построения мелкомасштабных карт (разрешения 0.5°) влажности почв с помощью характеристик климата и снятой со спутника температуры поверхности, особое внимание привлекают периоды больше 10 дней без осадков (Folwell et al., 2016). Положено начало построению мелкомасштабных прогнозных карт влажности почв в Европе для оценки будущего состояния растительности в связи с изменением климата (Ruosteenoja et al., 2018). Отметим, что в гумидном климате растительность наиболее чувствительна к засухам, часто связанным не с уменьшением осадков, а с повышением температур (Vicente-Serrano et al., 2013), которое и происходит при глобальном потеплении.

Известно, что рельеф является перераспределителем тепла, влаги, света (Неуструев, 1977), растворимых солей и частиц почвы. Заметим, что

измерение прямых факторов среды даже наилучшим образом только в точках наблюдения не дает знания о закономерностях пространственной организации системы, о значениях в других точках. За это ответственна перераспределяющая роль рельефа, знание которой позволяет рассчитать значения как самих прямых факторов, так и характеристик растительности. Исследование роли рельефа в формировании пространственного распределения абиотических факторов среды на крупных масштабах (Шарая, Шарый, 2011; Шарая, Сидякина, 2018; Шарая, Ван, 2021) показало, что более 70% дисперсии абиотических характеристик экосистемы может объясняться рельефом. В крупном масштабе вероятностные карты свойств экосистемы можно рассчитать на основе выявленных тесных связей между этими свойствами, измеренными в разных точках, и рельефом. Подробные данные о рельефе открыты и легко доступны. В текущих условиях термоаридного изменения климата важно иметь такие карты, которые могут указать области, где ожидается значительное снижение почвенной влажности, а также ее стабильное сохранение, формирующее убежища.

Пространственные закономерности изменения влажности почв мы рассматриваем как фундаментальное свойство геосистемы, инвариантное в целом по отношению к погодным условиям, которые не могут менять общей картины распределения влажности, но лишь влияют на контраст этой картины. Например, повышенная влажность будет преобладать в долинах по сравнению со склонами практически независимо от текущих условий погоды, создавая в условиях глобального потепления убежища (Hoylman et al., 2019), при этом дефицит воды с возрастанием температуры будет расти даже при постоянных осадках (Lutz et al., 2010). Цель данной работы — выявить закономерности изменения влажности почв на примере территории заказника “Удыль” в Нижнем Приамурье путем сравнения значений влажности с характеристиками рельефа и другими факторами, в том числе методом множественной регрессии. На основе полученных уравнений рассчитать крупномасштабную карту влажности почв, которая может быть использована при анализе пространственной организации растительности и расчете карт характеристик фитоценозов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Физико-географическая характеристика района исследования. Исследования проводились в заказнике “Удыль”, который находится в Нижнеамурской области, являющейся составной частью Амурско-Приморской физико-географической страны. Область его ограничена с севера Охотским морем, с юга — долиной реки Амур, с восто-

ка — Сахалинским заливом и Амурским лиманом, с запада — Буреинским нагорьем (рис. 1).

Рельеф исследуемой территории представлен поочередной сменой низко- и среднегорных коротких хребтов с хвойными и хвойно-широколиственными лесами и межгорными депрессиями с заболоченными днищами с крупными и мелководными озерами (Никонов, 1975). К зональным ландшафтам Нижнего Приамурья относятся бореальные средне- и южно-таежные (заказник “Удыль”); в южной части области частично представлены притихоокеанские суббореальные гумидные широколиственнолесные ландшафты (заповедник “Комсомольский”).

Заказник “Удыль” находится на северо-востоке Нижнеамурской области, на северо-западе Удыль-Кизинской низменности, вблизи поймы р. Амур. В заказнике преобладает озерно-аллювиальный низменный рельеф с короткими низкогорными хребтами (высота от 5 до 476 м), изучаемый участок находится в зоне островковой вечной мерзлоты. В низменной части распространены верховые болота и осоково-вейниковые луга на торфяно-глееземах и аллювиальных почвах. В низкогорной части произрастают лиственничные и елово-пихтовые леса, производные от них березовые и осиновые леса — на буроземах. Озеро Удыль расположено в центре заказника и занимает 25% его площади.

Климат заказника “Удыль” с жесткой зимой и умеренно теплым и влажным солнечным летом. Средняя многолетняя температура воздуха составляет -0.93°C , средняя для теплого и холодного периодов 13.1°C и -11.0°C соответственно. В среднем за год на территории выпадает 590 мм осадков, из них 63% — в теплый период. В заповеднике “Комсомольский”, расположенном на 200 км южнее по руслу р. Амур, в исследуемый период осадков выпадает примерно на 30% больше, среднегодовая температура воздуха близка к температуре в заказнике “Удыль”.

В заказнике “Удыль” летом 2014, 2016 и 2017 гг. в различных типах местоположения (геотопах), образующих систему местных ландшафтных сопряжений от элювиальных до супераквальных, заложили 25 пробных ландшафтно-экологических площадок. Выборку формировали рандомизированной и стратифицированной, т.е. площадки не располагали на одной трансекте, а распределяли по территории с целью большего охвата разнообразия лесных экосистем. На каждой из них проводилось описание растительности, почвенного профиля, были измерены температуры, влажность и гранулометрический состав почвы на разных глубинах, собраны данные о продуктивности фитоценозов. Влажность почв для горизонтов A_1 и C определяли визуальным полевым методом с выделением 5 категорий влажности

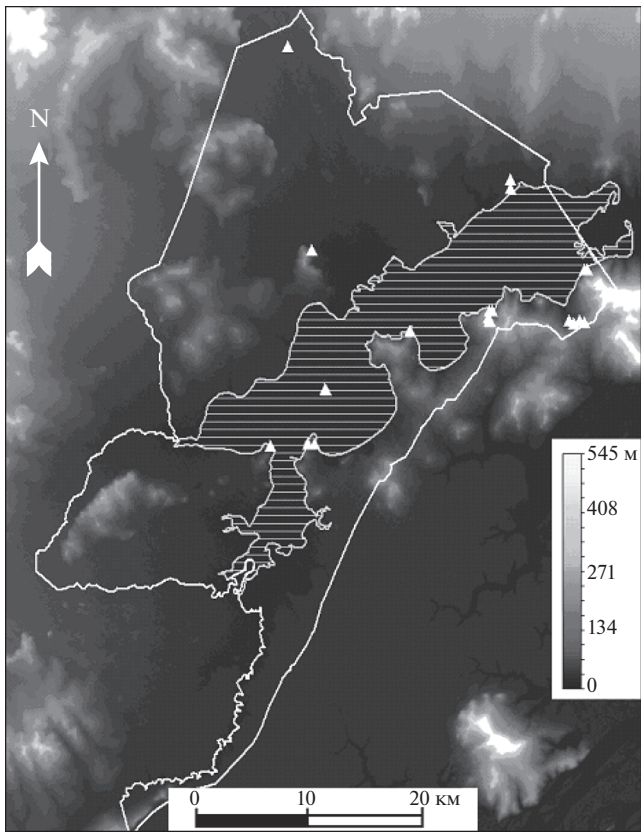
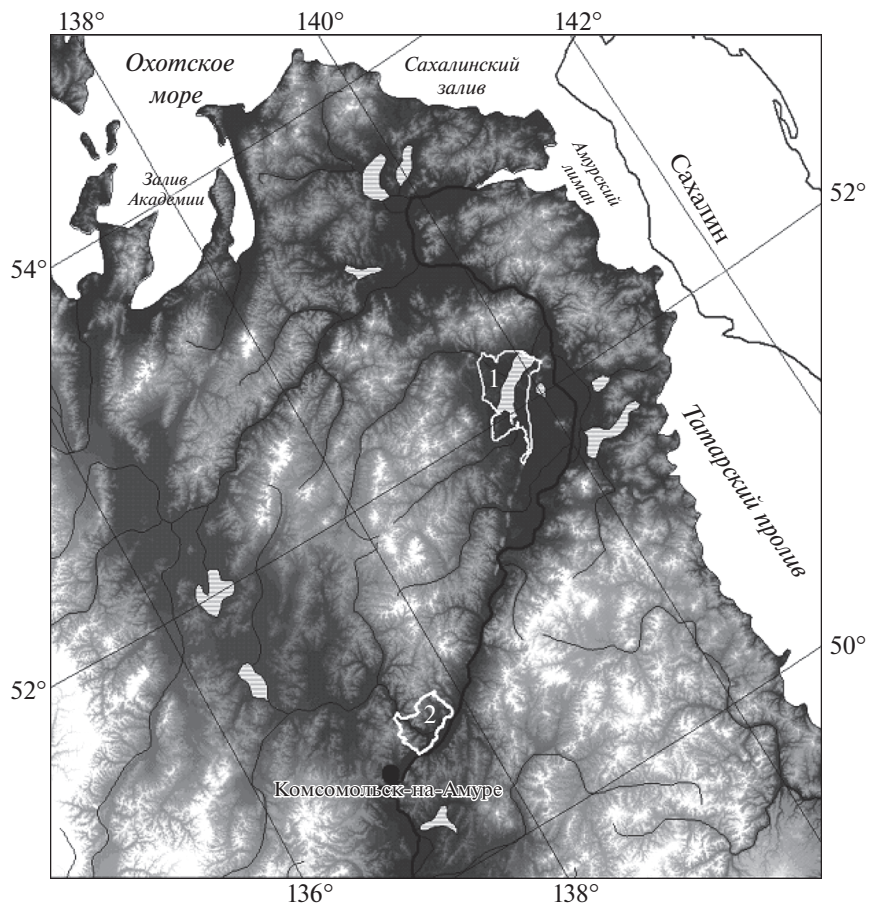


Рис. 1. Расположение заказника “Удиль” (1) и заповедника “Комсомольский” (2) в Нижнем Приамурье наверху, внизу — заказник “Удиль” с площадками исследования, заштрихованная область — поверхность озера.

(Добровольский, 1982) в баллах: 1 — “сухая”, 2 — “свежая”, 3 — “влажная”, 4 — “сырая”, 5 — “мокрая”. С целью перевода балльной оценки значений влажности в проценты проведены 28 контрольных измерений в разных типах почв: 16 измерений — для бурозема грубогумусового, наиболее распространенного на лесной территории типа почвы, 4 измерения — для аллювиальной гумусовой почвы, 4 — для бурозема, 2 — для торфяно-глебезема, 2 — для дерново-подбуря. При расчете средних значений контрольных измерений учитывался тип почвы и ее гранулометрический состав.

Контрольные измерения влажности показали, что для горизонта A_1 значение балла, равное 1, отвечает среднему значению 16.4% влажности, 2 — 20.1%, 3 — 26.5%, 4 — 35.7%, 5 — 47.6%. Для горизонта C значение балла, равное 1, отвечает среднему значению 21.4% влажности, 2 — 26.1%, 3 — 34.5%, 4 — 46.4%, 5 — 61.8%.

Методы статистического анализа. Измеренные свойства почв и растительности сравнивали с характеристиками рельефа — морфометрическими величинами (МВ). Для этого использовали систему 18-ти базовых МВ (Shary et al., 2002) и ряда составных (Шарый, Пинский, 2013). МВ рассчитывали из цифровой модели рельефа проекта NASA SRTM3 в проекции Меркатора UTM (северное полушарие, зона 54) с разрешением 50 м. Для анализа часть МВ — кривизны — преобразовывали для получения их нормального распределения по правилам, описанным в научной литературе (Шарый, Пинский, 2013), такие МВ помечали верхним индексом П.

Для оценки термо- и светорежима геосистемы использовали освещенность и экспозицию склонов. **Относительная освещенность склонов** $F_0(a, b)$ определяется как перпендикулярность падения солнечных лучей на земную поверхность, которая зависит от двух углов: склонения a Солнца над горизонтом и азимута Солнца b (Шарая, Шарый, 2011). 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 $\tau = 760$ Вт/м² есть солнечная постоянная на уровне моря, а $F_0(a, b)$ — освещенность в процентах. Угол a выбран 35°, а b подбирали так, чтобы он отвечал наиболее тесной связи с исследуемым свойством геосистемы. Из-за цикличности **экспозиции склонов** A_0 (0° и 360° — одно и то же, северный склон) в статистическом анализе нельзя применять ее выражение непосредственно. В связи с этим ее преобразовывали в нециклические функции от A_0 , а именно $\sin A_0$,

$\cos A_0$, $\sin A_{45}$ и $\cos A_{45}$, где $A_{45} = A_0 + 45^\circ$ (Шарый, Смирнов, 2013). Основываясь на статистических сравнениях, выбирали ту из них, для которой связь с исследуемым свойством почв была самой тесной. Воздействие экспозиции крутых и пологих склонов на данный показатель учитывали с помощью произведения или частного функции на крутизну GA (например, $GA \cos A_0$ или $\cos A_0/GA$ — крутые и пологие склоны соответственно).

Анализ связей влажности почвы с факторами среды проведен с помощью методов множественной регрессии, усовершенствованной для анализа экосистем (Шарый, Пинский, 2013). В методе применяется модель с четырьмя предикторами, и выбор самых важных предикторов принимается посредством перебора всех комбинаций из четырех предикторов, для которых осуществляется критерий линейной независимости (фактор “вспухания” дисперсии ≤ 5.15); отбиралась та комбинация предикторов, для которой найден наибольший коэффициент детерминации. Таким способом решалась методическая задача, заключающаяся в том, чтобы в полученной модели важные факторы не зависели от субъективного выбора авторов или их предпочтений. Верификацию моделей осуществляли с помощью метода кросс-валидации Аллена с применением эмпирического критерия $Degr < 50\%$ (Шарый, Пинский, 2013), выполнение которого было нужно для расчета карт по моделям. В уравнениях предикторы располагаются в порядке уменьшения их статистической значимости. Расчет моделей и построение карт проводились с помощью программы П.А. Шарого “Аналитическая ГИС Эко” (Wood, 2009).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет модели типов местоположений. Показано, что в крупном масштабе типы местоположения (МПЛ) являются основой для пространственного распределения лесных экосистем, в том числе влажности и температуры почвы (Коломыц, 2005; Шарая, Шарый, 2009, 2011). После сравнения выявленных во время полевых исследований типов местоположений на картографически привязанных площадках с рельефом была построена следующая модель:

$$\ln \text{МПЛ} = -0.004917Z - 0.3229k \min^{\text{П}} + 1.892 \times 10^{-5}(Z - Z_{\text{CP}})^2 - 0.4876M^{\text{П}} + 1.312; \quad (1)$$

$$R^2 = 0.854 \quad (Degr = 6.5\%). \quad P < 10^{-6},$$

где МПЛ — тип местоположения, Z — высота, $k \min$ — минимальная кривизна и M — кривизна,

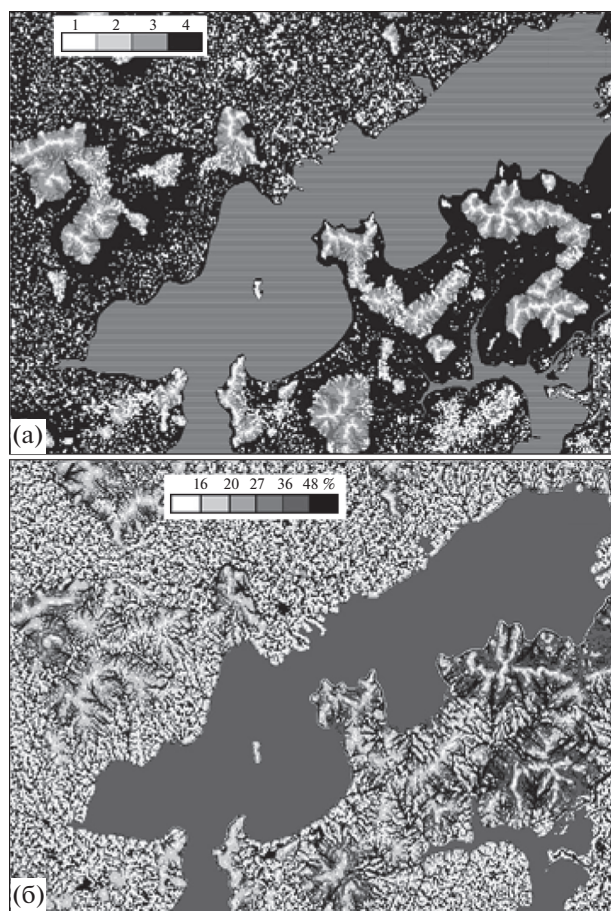


Рис. 2. Карты-схемы типов местоположений (а) и почвенной влажности в горизонте A_1 (б) на территории заказника. Типы местоположений: 1 – элювиальный и трансэлювиальный, 2 – трансаккумулятивный, 3 – аккумулятивный, 4 – супераккумулятивный.

описывающая несферичность. Типам местоположений были присвоены баллы, ранжированные по их положению в катене: элювиальный, трансэлювиальный ($\mathcal{E}$, $T\mathcal{E}$) – 1, трансаккумулятивный (TA) – 2, аккумулятивный (A) – 3 и супераккумулятивный (CA) – 4. Таким способом мы превратили качественный признак “типы местоположения” $МПЛ$ в количественную дискретную переменную, для которой в статистических сравнениях нужно брать логарифм, чтобы приблизить распределение ошибок к нормальному. Модель (1) объясняет 85% изменчивости $МПЛ$ характеристиками рельефа, содержит три предиктора со знаком “минус” – высота Z , минимальная кривизна $k_{\min}$ и несферичность M . Они описывают возрастание значений $МПЛ$ при снижении высоты – Z , на тальвегах – $k_{\min}$ и в вытянутых долинах и оврагах – M . Третий предиктор, квадрат высоты $(Z - Z_{\text{ср}})^2$ со знаком “плюс”, показывает, что увеличение значений $МПЛ$ с понижением высоты может нарушаться, когда в низкогорной местности $\mathcal{E}$, $T\mathcal{E}$ могут располагаться на высотах мень-

ших, чем TA и A . Это является следствием того, что пробные площади с разными типами местоположений находились не на одной трансекте, а являлись распределенными по всей местности. Модель (1) успешно прошла верификацию, поскольку имеет низкий показатель деградации ($Degr = 6.5\%$), что позволяет рассчитать по ней карту $МПЛ$ (рис. 2а), которая в свою очередь может быть использована для расчета матриц влажности.

Связи влажности почв с характеристиками рельефа. В горизонтах A_1 и C влажность менялась от “сухой” до “мокрой”. Среднее значение влажности для горизонта A_1 во всех типах местоположений составило 29.3% (близко к “свежей”), для горизонта C – 38.0% (между “свежей” и “влажной”). Коэффициент варируемости влажности в горизонтах несколько снижается с глубиной: A_1 – 64.5%, C – 56.7%. Коэффициент корреляции между значениями влажности двух горизонтов составлял $r = +0.65$.

Существенно возрастание влажности с увеличением площади сбора MCA – важной характеристикой потоков, описывающей, с какой площади на изучаемую площадку собираются потоки (коэффициент корреляции $r = +0.68$ для горизонта A_1 , $r = +0.65$ для C), с топографическим индексом влажности TI ($r = +0.65$ для A_1 , $r = +0.62$ для C), учитывающим не только площадь сбора, но и выполаживание склонов, которое способствует торможению или задержанию потоков влаги при их движении по склонам, с характеристикой мощности потоков SPI ($r = +0.65$ для A_1 , $r = +0.63$ для C). При этом связь влажности горизонта C с этими предикторами несколько слабее, чем для A_1 . Локальные характеристики потоков – кривизны – также заметно влияют на почвенную влажность в заказнике. Горизонтальная кривизна kh со знаком “минус” описывает собирающие склоны, теснота связи влажности горизонта A_1 с ней практически такая же, как с MCA и TI ($r = -0.68$ для горизонта A_1 , $r = -0.46$ для C). Следует отметить, что кривизна kh описывает первый механизм аккумуляции водных потоков и твердых частиц за счет их сближения – конвергенции. Вертикальная кривизна kv описывает, с одной стороны, профиль склонов – вогнутый (со знаком “минус”), выпуклый (со знаком “плюс”), с другой – второй механизм аккумуляции за счет замедления потоков на вогнутых склонах. Связь влажности с kv для горизонта A_1 заметно слабее, чем с kh ($r = -0.46$), а для горизонта C немного теснее ($r = -0.48$ для C).

Влажность зависит от типов местоположения $МПЛ$: движение вниз по катене приводит к росту влажности ($r = +0.63$ для A_1 , $r = +0.59$ для C). Эта связь с $МПЛ$ автоматически означает связь со всеми предикторами, включенными в модель

МПЛ (1): с высотой Z , килевыми формами $k_{\min}$ и несферичностью M .

Заметная связь обнаруживается для почвенной влажности с формами рельефа. Существенна зависимость влажности от форм, игнорирующих гравитацию (форм, сохраняющих параметры описания при любом повороте и наклоне в гравитационном поле): от средневогнутых, которые описывает средняя кривизна H со знаком “минус” ($r = -0.67$ для A_1 , $r = -0.52$ для C), от килевых форм (их описывает минимальная кривизна $k_{\min}$ со знаком “минус” $r = -0.64$ для A_1 , $r = -0.52$ для C) и от форм, находящихся вне гребней, описываемых максимальной кривизной $k_{\max}$ со знаком “минус” ($r = -0.66$ для A_1 , $r = -0.57$ для C). Заметим, что килевые формы и формы вне гребней не являются идентичными (последние включают в себя еще седловины). Значения коэффициентов корреляции для горизонта C с МВ не снижаются сильно по сравнению с A_1 .

Теснота связи влажности с температурой почв такого же порядка, как и с МВ ($r = -0.65$ для A_1 , $r = -0.59$ для C): возрастание температуры сопровождается снижением влажности в обоих горизонтах. Заметим, что выявленные закономерности изменения почвенной температуры на территории заказника показывают, что она возрастает с удалением от озера вверх по катене и на юго-западных склонах (Шарая, Ван, 2021). По связи влажности с температурой можно заключить, что влажность растет с приближением к озеру, с ростом баллов *МПЛ* от элювиального к аккумулятивному, и на северо-восточных склонах и, соответственно снижается на юго-западных склонах. В заповеднике “Комсомольский”, который находится на южной границе Нижнего Приамурья (Петренко, 2014), на распределение влажности почвы также влияет экспозиция склонов: на юго-западных склонах почва менее влажная. Подобные результаты получены для территорий южно-Сихотэ-Алиня (Комарова, 2014).

Изменение почвенной влажности вслед за изменением рельефа можно оценить не только с помощью коэффициентов корреляции, но и сравнением влажности в контрастирующих условиях. В табл. 1 приведены отношения средних значений влажности почв для контрастирующих условий рельефа и других факторов. Из всего ряда рассмотренных факторов в табл. 1 перечислены те, для которых отношения в разных диапазонах условий различаются почти в полтора раза или больше.

Контрастирующие условия записаны в столбцах 1 и 4 таблицы через дробь: в числителе и знаменателе находятся сравниваемые условия. Сравнение среднего значения влажности на площадках с MCA большей, чем среднее значение для всей выборки ($MCA > MCA_{CP}$), и на площадках с меньшей средней ($MCA < MCA_{CP}$) дает отношение

2.13 для горизонта A_1 и 2.29 для C . Иными словами, более чем в 2 раза возрастает влажность на площадках с площадью сбора больше среднего значения для обоих горизонтов. Подобная разница выявляется и для топографического индекса влажности TI (отношения 2.25 и 2.32 для горизонта A_1 и C соответственно).

Наибольшим отношением влажности характеризуются площадки элювиальных и аккумулятивных местоположений: 3.23 — для горизонта A_1 и 2.71 — для C . В табл. 1 приведены отношения для склонов хорошо выраженной северо-восточной и юго-восточной экспозиций, отвечающих $\sin A_{45} > 0.5$ и $\sin A_{45} < -0.5$ соответственно; эти отношения составляют 1.92 — для горизонта A_1 и 1.94 — для C . Следует отметить, что изменения влажности на этих склонах больше, чем при сравнении склонов северной ($\cos A_0 > 0.5$) и южной ($\cos A_0 < -0.5$) экспозиций, где отношения равны 1.76 — для горизонта A_1 и 1.46 — для C . Выявлено, что влажность растет на изучаемом участке в направлении на северо-восток ($X + Y$) с приближением к пойме р. Амур в сторону берегов Охотского моря: отношение $(X + Y) > 0 / (X + Y) < 0$ равно 1.72 для A_1 . Заметные различия находим при сравнении грубогумусных буроземов с другими почвами (отношение “другие почвы/бурозем грубогумусный” равно 2.22 для A_1), а также при сравнении площадок с разными фитоценозами (отношение “другие фитоценозы/лиственничники” равно 1.60 для C) (табл. 1).

В целом из табл. 1 видно, что разделение изучаемой выборки только по диапазонам МВ дает существенные различия в значениях почвенной влажности. Это подтверждает возможность построения пространственной модели влажности по рельефу.

Расчет моделей влажности почвы. Распределение влажности в гумусовом горизонте почвы определяется следующим регрессионным уравнением:

$$\ln Bl_{A_1} = 0.9291 \ln MPЛ + 1.328khe^{\Pi} + 0.3819E^{\Pi} + 2.161 \times 10^{-6}(X + Y)/2^{1/2} - 1.037, \quad (2)$$

$$R^2 = 0.779 \text{ (Degr} = 11.2\%). \quad P < 10^{-4},$$

где $\ln Bl_{A_1}$ — влажность гумусового горизонта, логарифмированная из-за дискретности зависимой переменной. Модель (2) объясняет 78% дисперсии влажности и включает следующие предикторы, расположенные в порядке убывания их значимости: $\ln MPЛ$ — типы местоположений, khe — избыточная горизонтальная кривизна, характеризующая расчлененность рельефа, $(X + Y)$ — расстояние на северо-восток, E — разностная кривизна, описывающая преобладание первого механизма аккумуляции за счет сближения потоков над вторым механизмом вследствие замедления

Таблица 1. Отношение средних значений влажности почв для контрастирующих условий рельефа и других факторов

Диапазон контрастирующих условий	Отношение значений влажности		Диапазон контрастирующих условий	Отношение значений влажности	
	горизонт			горизонт	
	A_1	C		A_1	C
$(X + Y) > 0 / (X + Y) < 0^*$	1.72	1.60	$Z < 90 \text{ м} / Z > 90 \text{ м}$	1.60	1.30
$\sin A_{45} > +0.5 / \sin A_{45} < -0.5$	1.92	1.94	$H < 0 / H > 0$	1.99	1.50
$\cos A_0 > +0.5 / \cos A_0 < -0.5$	1.78	1.46	$k_{\min} < 0 / k_{\min} > 0$	1.74	1.86
$k_{\max} < 0 / k_{\max} > 0$	1.90	1.69	$kh < 0 / kh > 0$	1.96	1.88
$kv < 0 / kv > 0$	1.66	1.48	$M < M_{\text{ср}} / M > M_{\text{ср}}$	2.07	1.81
$MCA > MCA_{\text{ср}} / MCA < MCA_{\text{ср}}$	2.13	2.29	$TI > TI_{\text{ср}} / TI < TI_{\text{ср}}$	2.25	2.32
$MPL_CA / MPL_Э, TЭ$	3.23	2.71	$GA < GA_{\text{ср}} / GA > GA_{\text{ср}}$	1.30	1.33
$T < T_{\text{ср}} / T > T_{\text{ср}}$	1.78	1.75	$SPI > SPI_{\text{ср}} / SPI < SPI_{\text{ср}}$	2.05	2.10
<i>Почвы: другие/бурозем грубо-гумусный</i>	2.22	1.64	<i>Фитоценозы: другие/лиственничники</i>	1.34	1.60

Диапазоны условий: $(X + Y)$ – расстояние от центра озера Удиль до северо-восточного ($(X + Y) > 0$) и юго-западного ($(X + Y) < 0$) края карты; Z – абсолютная высота; рассматриваются диапазоны $Z < 90 \text{ м}$ и $Z > 90 \text{ м}$; $\sin A_{45}$ – “северо-восточность” склонов (диапазон $\sin A_{45} > +0.5$ включает склоны, отвечающие ориентации на северо-восток, $\sin A_{45} < -0.5$ отвечают ориентации склонов на юго-запад); H – средняя кривизна, со знаком “минус” отвечает средневогнутым формам, со знаком “плюс” – средневыпуклым; $\cos A_0$ – “северность” склонов ($\cos A_0 > +0.5$ включает склоны, отвечающие ориентации на север, склоны $\cos A_0 < -0.5$ включает склоны ориентации на юг); $k_{\min}$ – со знаком “минус” описывает килевые формы, со знаком “плюс” – другие формы вне килей; $k_{\max}$ – со знаком “плюс” описывает гребневые формы, со знаком “минус” – другие формы вне гребней; kh – со знаком “минус” описывает конвергентные склоны, которые собирают потоки за счет их сближения, со знаком “плюс” – дивергентные склоны, рассеивающие потоки; kv – со знаком “минус” описывает вогнутые в профиле склоны, которые замедляют потоки, со знаком “плюс” – выпуклые, ускоряющие потоки; M – несферичность, малые значения описывают формы, близкие к сферическим, большие – далекие от сферических, то есть вытянутые; MCA – площадь сбора, описывает площадь, которая собирает потоки жидких и твердых частиц на данную площадку; TI – топографический индекс влажности; MPL – типы местоположения ($Э, TЭ$ – элювиальные и трансэлювиальные, CA – супераккумулятивные); GA – крутизна склонов; T – измеренная температура почвы (для горизонта A_1 рассматривается температура на глубине 30 см, для горизонта C – при 40 см, $T_{\text{ср}}$ – среднее значение по выборке); SPI – индекс мощности потоков; *Почвы* – определяется отношение влажности в двух группах: буроземы грубогумусные и все другие. *Фитоценозы* – определяется отношение влажности в двух группах: лиственничники и все другие.

их на вогнутых в профиле склонах. В целом модель описывает возрастание влажности гумусового горизонта почвы: а) при движении сверху вниз по ландшафтной катене $\ln MPL$; б) в местах сильно расчлененного в плане рельефа khe ; в) при движении по исследуемому участку от юго-западного угла карты к северо-восточному, т.е. к южному берегу Охотского моря $(X + Y)/2^{1/2}$; г) на участках, где преобладает первый механизм аккумуляция потоков воды и твердых частиц E . Модель (2) успешно прошла верификацию, поскольку имеет низкий показатель деградации $Degr = 11.2\%$, по ней может быть рассчитана карта (рис. 26).

Распределение влажности почвы на максимальных глубинах в горизонте C описывает уравнение регрессии, приведенное ниже:

$$\begin{aligned} \ln B_{l_C} &= 0.6910 \ln MPL + 2.361 \times 10^{-5} \times \\ &\times (X + Y)/2^{1/2} - 0.5061 \cos(A_0)/GA + \\ &+ 0.2924 F(35.170) - 16.29, \\ R^2 &= 0.593 (Degr = 31.24\%). \quad P < 10^{-4}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\ln B_{l_C}$ – логарифм влажности почвенного горизонта C . Предикторы расположены в порядке убывания их статистической значимости: как и в случае с влажностью в горизонте A_1 , на распределение B_{l_C} оказывает влияние в первую очередь тип местоположения MPL , когда от водоразделов до тальвегов значения ее возрастают; направление на северо-восток $(X + Y)$ становится вторым по значимости влияния на B_{l_C} и определяет ее увеличение при приближении к южным берегам Охотского моря. Следующие два предиктора: $\cos(A_0)/GA$, который со знаком “минус” отвечает “южности” пологих склонов, и $F(35.170)$ – освещенность склонов с юга (азимут 170°), являются статистически незначимыми. В этом случае по принятым правилам статистического анализа нельзя доверять знакам этих предикторов в уравнении, однако их присутствие в модели увеличивает коэффициент детерминации и указывает на тенденцию зависимости влажности от экспозиции и освещенности. Такую тенденцию повышения влажности глубинных горизонтов почвы на пологих южных склонах при освещенности с юга

можно объяснить тем, что на них быстрее конденсируются промерзшие запасы влаги из-за большей освещенности и прогрева, чем на северных. Иными словами, на таких склонах может происходить большее оттаивание “замерзшей” влаги в горизонте C . Заметим, что при выборе диапазонов определенно южных и северных склонов ($\cos A_0 > +0.5$ и $\cos A_0 < -0.5$) мы получаем отношение, указывающее на то, что влажность в обоих горизонтах возрастает на северных склонах. В работах других авторов показано влияние на распределение влажности почвы площади водосбора (MCA), абсолютной высоты (Z) и вертикальной кривизны (kv) (Гопп, 2012; Гопп и др., 2017). В результатах наших исследований связи с этими МВ также выявлены (табл. 1), однако они не являются первостепенными. Показатель деградации модели (3) менее 50%, что указывает на успешную верификацию (Шарый, Пинский, 2013) и позволяет рассчитывать вероятностную карту влажности по матрицам МВ.

Следует отметить, что теснота связи с рельефом для горизонта A_1 (модель (2)) выше, чем для C (модель (3)), что, по-видимому, определяется “вмешательством” на глубине в распределение влажности других факторов, отличных от характеристик потоков на земной поверхности, которые более важны для гумусового горизонта.

Если в модель (2) для влажности A_1 ввести в качестве предиктора температуру верхнего слоя, получим уравнение:

$$\begin{aligned} \ln B_{A_1} = & -0.4016kh^{\Pi} + 8.364 \times 10^{-3} \times \\ & \times (T_{30} - T_{30_{cp}})^2 + 0.5510khe^{\Pi} - 0.1143 \times \\ & \times F(35.240) + 6.894 \quad R^2 = 0.816 \quad (Degr = 8.5\%). \end{aligned} \quad (4)$$

$$P < 10^{-5},$$

где T_{30} есть температура на глубине 30 см (нелинейное выражение от нее), $F(35.240)$ есть освещенность с юго-запада (азимут 240°), остальные предикторы описаны выше. Коэффициент детерминации модели (4) возрастает по сравнению с моделью (2), а показатель деградации $Degr$ — понижен.

Включение в модель (3) в качестве предикторов температуры перекрестного члена, учитывающего гранулометрический состав горизонта и свойства фитоценозов, приводит к следующему уравнению:

$$\begin{aligned} \ln B_{A_1} = & -0.0734T_{40} + 0.2396LEC \ln IC + \\ & + 8.437 \times 10^{-6} \times (Z - Z_{cp})^2 + 0.0707TI + 0.7976 \end{aligned} \quad (5)$$

$$R^2 = 0.731 \quad (Degr = 11.3\%). \quad P < 10^{-4},$$

где T_{40} есть температура на глубине 40 см, $LEC \cdot \ln IC$ есть перекрестный член — произведение логарифма гранулометрического состава го-

ризонта C , определенного в баллах, на индикатор LEC , различающий лиственный и другие фитоценозы (для площадок с лиственными насаждениями он равен 1, для других — равен 0), TI есть топографический индекс влажности. Коэффициент детерминации модели (5) возрастает по сравнению с моделью (2), а показатель деградации $Degr$ снижен.

Модели (4) и (5) характеризуются более тесными связями, отражают зависимость влажности от других факторов среды и более успешной верификацией (меньше $Degr$). Однако, несмотря на то, что эти модели выявляют закономерности и находят более влияющие независимые переменные, для расчета карт они не подходят. Причина в том, что влажность есть сумма предикторов с регрессионными коэффициентами, поэтому необходимо иметь матрицы всех предикторов, а гранулометрический состав IC известен только на площадках наблюдения, но не для всей местности (нет матрицы). Матрицы характеристик рельефа рассчитываются по цифровой модели рельефа для всей местности, с этим нет проблем.

Влиятельность гранулометрического состава, напрямую связанного с литологией материнских пород, на влажность показана также для полигона Комсомольского заповедника (Петренко, 2014), подобную связь для заказника удалось установить методами теории информации (Ван, Юрикова, 2019).

Закономерности, выявленные для другой территории, могут отличаться от приведенных нами. Однако в отличие от динамичных, зависящих от сезона погодных условий данных о влажности, закономерности в каком-то смысле являются фундаментальным свойством, описывающим правила согласования компонентов в системе. Например, если почвенная влажность в оврагах по сравнению с приводораздельными областями в 3.2 раза выше, а на юго-западных склонах она меньше по сравнению с северо-восточными в 1.9 раза, то прошедшие дожди могут изменить отношения, но не изменят самой закономерности, выражаемой узором карты. Рассчитанные вероятностные карты влажности дают узор распределения влажности по территории. Дождливый или засушливый периоды меняют контраст, но не узор этой карты, причем узор важнее контраста, поскольку он много более стабилен и не изменится прежде изменения рельефа, создавая этим убежища для растительности при глобальном потеплении (Hoylman et al., 2019).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании показано, что влажность в обоих почвенных горизонтах увеличивается при движении вниз по ландшафтной катене, но также — при приближении к Охотскому морю. В гумусо-

вом горизонте A_1 возрастание влажности почвы происходит дополнительно при увеличении расчлененности местности и на конвергентных склонах долин и оврагов, где преобладает аккумуляция за счет сближения потоков. Модель распределения влажности в горизонте C дополнена статистически незначимыми предикторами — экспозицией пологих южных склонов $\cos(A_0)/GA$ и освещенностью склонов с юга $F(35,170)$, с которыми связь положительна. При использовании в моделях почвенной влажности (4) и (5) других факторов среды, помимо МВ, получаем в качестве влияющих предикторов температуру, гранулометрический состав вкупе с индикатором, разделяющим фитоценозы на листовенные и другие.

Знания о закономерностях изменения почвенной влажности важны для понимания согласования компонентов геосистем, а также для оценок их изменения в условиях меняющегося климата. На примере территории заказника “Удиль” мы показали, что закономерности могут быть найдены путем сравнения влажности с характеристиками рельефа. Подробные матрицы рельефа являются открытыми, что делает легко доступным анализ с их использованием. Выявление тесных статистических связей и успешная верификация моделей позволяет рассчитывать вероятностные карты влажности, которые являются более обоснованными связями с рельефом, чем полученные простой интерполяцией и экстраполяцией, поскольку рельеф является распределителем влаги, тепла и света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ван П.С., Юрикова Е.А. Информационно-статистическое моделирование организации лесных геосистем Нижнего Приамурья (на примере заказника “Удиль”) // Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования: Матер. Междунар. науч.-пр. конф., посв. памяти чл.-кор. РАН А.Н. Антипова. Иркутск, 2019. С. 788–791.
- Гопп Н.В. Исследование влияния рельефа на почвенно-растительный покров // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 2. № 3. С. 77–81.
- Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Методы геоморфометрии и цифрового картографирования для оценки пространственной изменчивости свойств агросерой почвы склона // Почвоведение. 2017. № 1. С. 24–34.
- Добровольский В.В. Практикум по географии почв с основами почвоведения. М.: Просвещение, 1982. 127 с.
- Климина Е.М. Ландшафтно-картографическое обеспечение территориального планирования (на примере Хабаровского края). Владивосток: Дальнаука, 2007. 132 с.
- Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 232 с.
- Коломыц Э.Г. Бореальный экотон и географическая зональность: Атлас-монография. М.: Наука, 2005. 390 с.
- Коломыц Э.Г. Локальные коэффициенты увлажнения и их значение для экологических прогнозов // Известия РАН. Сер. географ. 2010. № 5. С. 61–72.
- Комарова Т.А. Сравнительная оценка условий среды на основе режимных наблюдений и экологических шкал // Комаровские чтения. 2004. № 50. С. 28–59.
- Неуструев С.С. Элементы географии почв // Генезис и география почв. М.: Наука, 1977. С. 149–314.
- Никонов В.И. Природные ландшафты Нижнего Приамурья // Сибирский географический сборник. 1975. № 10. С. 128–175.
- Петренко П.С. Моносистемная организация лесных биогеоценозов на бореальном экотоне Нижнего Приамурья // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1. С. 84–92.
- Петренко П.С. Пространственная организация лесных топогеосистем Нижнего Приамурья (на примере заповедника “Комсомольский”) // География и природные ресурсы. 2017. № 3. С. 36–45.
- Раменский Л.Г. Избранные работы. Проблемы и методы изучения растительного покрова. Л.: Наука, 1971. 334 с.
- Шарая Л.С., Ван П.С. Закономерные изменения температур почв на территории заказника “Удиль” (Нижнее Приамурье) // География и природные ресурсы. 2021. Т. 42. № 2(166). С. 51–58.
- Шарая Л.С., Сидякина Л.В. Пространственная изменчивость зеленой массы травянистой растительности горы Могутова (Самарская Лука) // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2018. Т. XII. № 4. С. 94–103.
- Шарая Л.С., Шарый П.А. Связь абиотических и биотических характеристик лесной экосистемы Жигули // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 1. С. 22–29.
- Шарая Л.С., Шарый П.А. Изучение пространственной организации лесных экосистем с помощью методов геоморфометрии // Экология. 2011. № 1. С. 3–10.
- Шарый П.А., Пинский Д.Л. Статистическая оценка связи пространственной изменчивости содержания органического углерода в серой лесной почве с плотностью, концентрациями металлов и рельефом // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1344–1356.
- Шарый П.А., Смирнов Н.С. Механизмы влияния солнечной радиации и анизотропии местности на растительность темнохвойных лесов Печоро-Илычского заповедника // Экология. 2013. № 1. С. 11–19.
- Hoylman Z.H., Jencso K.G., Hu J., Holden Z.A., Allred B., Dobrowski S., Robinson N., Martin J.T., Affleck D., Seielstad C. The topographic signature of ecosystem climate sensitivity in the western United States // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. № 24. P. 14508–14520.
- Folwell S.S., Harris P.P., Taylor C.M. Large-scale surface responses during European dry spells diagnosed from land surface temperature // J. Hydrometeorology. 2016. V. 17. № 3. P. 975–993.
- Lutz J.A., van Wageningen J.W., Franklin J.F. Climatic water deficit, tree species ranges, and climate change in Yosemite National Park // J. Biogeography. 2010. V. 37. № 5. P. 936–950.

McLaughlin B.C., Ackerly D.D., Klos P.Z., Natali J., Dawson T.E., Thompson S.E. Hydrologic refugia, plants, and climate change // *Global Change Biology*. 2017. V. 23. № 8. P. 2941–2961.

Morelli T.L., Daly C., Dobrowski S.Z., Dulen D.M., Ebersole J.L., Jackson S.T., Lundquist J.D., Millar C.I., Maher S.P., Monahan W.B., Nydick K.R., Redmond K.T., Sawyer S.C., Stock S., Beissinger S.R. Managing climate change refugia for climate adaptation // *PLoS ONE*. 2016. V. 11. № 8. P. e0159909.

Ruosteenoja K., Markkanen T., Venäläinen A., Räisänen P., Peltola H. Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century // *Climate Dynamics*. 2018. V. 50. № 3. P. 1177–1192.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*. 2002. V. 107. P. 1–32.

Vicente-Serrano S.M., Gouveia C., Camarero J.J., Beguería S., Trigo R., López-Moreno J.I., Azorín-Molina C., Pasho E., Lorenzo-Lacruz J., Revuelto J., Morán-Tejeda E., Sanchez-Lorenzo A. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2013. V. 110. № 1. P. 52–57.

Wood J. Overview of software packages used in geomorphometry // *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*. Amsterdam etc.: Elsevier, 2009. V. 33. Chapter 10. P. 257–267.

Natural Changes in Soils' Moisture in Coniferous Forests of the "Udyly" Natural Reserve in the Lower Amur Basin

L. S. Sharaya^{1, *} and P. S. Van²

¹*Institute of Ecology of Volga Basin of the RAS, Komzina st., 10, Tolyatti, Samara Oblast, 445003 Russia*

²*Federal State Budget Institution "Zapovednoye Priamur'ye", Serysheva st., 60, Khabarovsk, 680038 Russia*

*E-mail: l_sharaya@mail.ru

In the low-mountainous part of the "Udyly" nature reserve, covered by larch and spruce-fir forests, landscape-ecological studies have been carried out on 25 test sites. In order to search for spatial change patterns, data were collected on soil moisture and temperatures, as well as the characteristics of phytocenoses. The results of the soil moisture analysis are reported in this article. Correlations between soil moisture and the landscape characteristics, obtained using the multiple regression method, showed that from 59 to 78% of the moisture variance can be explained by the landscape properties. The changes in humidity depend on the plot's position in the catena, the distance to the coast of the Sea of Okhotsk, and on the characteristic features of curvature flows. The explained variability of moisture content increases from 73 to 82% if, in addition to the landscape characteristics, other characteristics are additionally used as predictors of spatial variability, such as soil temperatures, particle size distribution, and characteristics of groups of phytocenoses. However, the successful verification of models based only on the landscape characteristics allows to obtain soil moisture matrices, which can be used to calculate probability maps of the phytocenoses characteristics.

Keywords: soil moisture, spatial modelling, landscape, multiple regression.

REFERENCES

Dobrovolskii V.V., *Praktikum po geografii pochv s osnovami pochvovedeniya* (Practical course on soil geography with the basics of soil science), Moscow: Prosveshchenie, 1982, 127 p.

Folwell S.S., Harris P.P., Taylor C.M., Large-scale surface responses during European dry spells diagnosed from land surface temperature, *J. Hydrometeorology*, 2016, Vol. 17, No. 3, pp. 975–993.

Gopp N.V., Issledovanie vliyaniya rel'efa na pochvenno-rastitel'nyi pokrov (Research of influence of a relief on a soil and vegetation cover), *Interesko Geo-Sibir'*, 2012, Vol. 2, No. 3, pp. 77–81.

Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V., The methods of geomorphometry and digital soil mapping for assessing spatial variability in the properties of agrogray soils on a slope, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 1, pp. 20–29.

Hoylman Z.H., Jencso K.G., Hu J., Holden Z.A., Allred B., Dobrowski S., Robinson N., Martin J.T., Affleck D., Seielstad C., The topographic signature of ecosystem climate

sensitivity in the western United States, *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46, No. 24, pp. 14508–14520.

Klimina E.M., *Landshaftno-kartograficheskoe obespechenie territorial'nogo planirovaniya (na primere Khabarovskogo kraja)* (Landscape and cartographic support of territorial planning (on the example of the Khabarovsk Territory)), Vladivostok: Dal'nauka, 2007, 132 p.

Kolomyts E.G., *Boreal'nyi ekoton i geograficheskaya zonal'nost'* (Boreal ecotone and geographic zoning), Moscow: Nauka, 2005, 390 p.

Kolomyts E.G., Lokal'nye koeffitsienty uvlazhneniya i ikh znachenie dlya ekologicheskikh prognozov (Local humidify factors and there importance for the ecological prognoses), *Izvestiya RAN. Ser. geograf.*, 2010, No. 5, pp. 61–72.

Komarova T.A., Sravnitel'naya otsenka uslovii sredy na osnovе rezhimnykh nablyudenii i ekologicheskikh shkal (Comparative estimation of environment condition by means of regime observations and ecological scales), *Komarovskie chteniya*, 2004, No. 50, pp. 28–59.

- Krauklis A.A., *Problemy eksperimental'nogo landshaftovedeniya* (Experimental Landscape Science Challenges), Novosibirsk: Nauka, 1979, 232 p.
- Lutz J.A., van Wagendonk J.W., Franklin J.F., Climatic water deficit, tree species ranges, and climate change in Yosemite National Park, *J. Biogeography*, 2010, Vol. 37, No. 5, pp. 936–950.
- McLaughlin B.C., Ackerly D.D., Klos P.Z., Natali J., Dawson T.E., Thompson S.E., Hydrologic refugia, plants, and climate change, *Global Change Biology*, 2017, Vol. 23, No. 8, pp. 2941–2961.
- Morelli T.L., Daly C., Dobrowski S.Z., Dulen D.M., Ebersole J.L., Jackson S.T., Lundquist J.D., Millar C.I., Maher S.P., Monahan W.B., Nydick K.R., Redmond K.T., Sawyer S.C., Stock S., Beissinger S.R., Managing climate change refugia for climate adaptation, *PLoS ONE*, 2016, Vol. 11, No. 8, pp. e0159909.
- Neustruev S.S., *Elementy geografii pochv* (Elements of soil geography), In: *Genezis i geografiya pochv* (Genesis and soil geography), Moscow, 1977, pp. 149–314.
- Nikonov V.I., *Prirodnye landshafty Nizhnego Priamur'ya* (Natural landscapes of the Lower Amur region), *Sibirskii geograficheskii sbornik*, 1975, No. 10, pp. 128–175.
- Petrenko P.S., Monosistemnaya organizatsiya lesnykh biogeotsenozov na boreal'nom ekotone Nizhnego Priamur'ya (Monosystem organization of forest geosystems on the boreal ecotone in Lower By-Amur region), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, Vol. 16, No. 1, pp. 84–92.
- Petrenko P.S., Prostranstvennaya organizatsiya lesnykh topogeosistem Nizhnego Priamur'ya (na primere zapovednika "Komsomol'skii") (Spatial organization of spatial topogeosystems in the Lower Amur region (a case study of the Komsomol'skii Zapovednik)), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2017, No. 3, pp. 36–45.
- Ramenskii L.G., *Izbrannye raboty. Problemy i metody izucheniya rastitel'nogo pokrova* (Problems and methods in the study of the plant cover: collected works), Leningrad: Nauka, 1971, 334 p.
- Ruostenoja K., Markkanen T., Venäläinen A., Räisänen P., Peltola H., Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century, *Climate Dynamics*, 2018, Vol. 50, No. 3, pp. 1177–1192.
- Sharaya L.S., Sharyi P.A., *Izuchenie prostranstvennoi organizatsii lesnykh ekosistem s pomoshch'yu metodov geomorfometrii* (Geomorphometric study of the spatial organization of forest ecosystems), *Ekologiya*, 2011, No. 1, pp. 3–10.
- Sharaya L.S., Sharyi P.A., Svyaz' abioticheskikh i bioticheskikh kharakteristik lesnoi ekosistemy Zhiguli (Relationships between abiotic and biotic features in the forest ecosystem Zhiguli), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2009, Vol. 11, No. 1–1, pp. 22–30.
- Sharaya L.S., Sidiyakina L.V., Prostranstvennaya izmenchivost' zelenoi massy travyanistoi rastitel'nosti gory Mogutova (Samarskaya Luka) (Spatial variability of green mass of herbaceous plants on Mount Mogutova (Samarskaya Luka)), *Fitoraznoobrazie Vostochnoi Evropy*, 2018, Vol. XII, No. 4, pp. 94–103.
- Sharaya L.S., Van P.S., Zakonomernye izmeneniya temperatur pochv na territorii zakaznika "Udyl'" (Nizhnee Priamur'e) (Regular changes in soil temperatures on the territory of the Udyl' wildlife reserve (Lower Amur region)), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2021, Vol. 42, No. 2(166), pp. 51–58.
- Shary P.A., Pinskii D.L., Statistical evaluation of the relationships between spatial variability in the organic carbon content in gray forest soils, soil density, concentrations of heavy metals, and topography *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 11, pp. 1076–1087.
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V., Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma*, 2002, Vol. 107, pp. 1–32.
- Shary P.A., Smirnov N.S., Mechanisms of the effects of solar radiation and terrain anisotropy on the vegetation of dark conifer forests in the Pechora-Ilych state biosphere reserve, *Russian J. Ecology*, 2013, Vol. 44, No. 1, pp. 9–17.
- Van P.S., Yurikova E.A., Informatsionno-statisticheskoe modelirovanie organizatsii lesnykh geosistem Nizhnego Priamur'ya (na primere zakaznika "Udyl'") (Informational statistic modeling of forest geosystems' organization for the Low Priamurye territory (by the example of "Udyl'" nature reserve)), *Geographical foundations and environmental principles of regional policy of nature management*, Proc. of International Sci.-Pract. Conf., Irkutsk, pp. 788–791.
- Vicente-Serrano S.M., Gouveia C., Camarero J.J., Beguería S., Trigo R., López-Moreno J.I., Azorín-Molina C., Pasho E., Lorenzo-Lacruz J., Revuelto J., Morán-Tejeda E., Sanchez-Lorenzo A., Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2013, Vol. 110, No. 1, pp. 52–57.
- Wood J., Overview of software packages used in geomorphometry, In: *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, Amsterdam etc.: Elsevier, 2009, Vol. 33, Chapter 10, pp. 257–267.