

УДК 630*181(182.5)

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-53-67

ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ И ПО МАТЕРИАЛАМ ЛЕСОУСТРОЙСТВА

С.К. Фарбер, д-р с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-3013>

Н.С. Кузьмик, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [V-6094-2019](https://orcid.org/0000-0003-4707-9011), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4707-9011>

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, д. 50/28, Академгородок, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, kuzmik@ksc.krasn.ru

Наглядность пространственного распределения влажности почв достигается посредством картографирования, которое наиболее просто осуществляется по данным цифровой модели. Информация о влажности почв хранится в поле атрибутивной таблицы слоя географической информационной системы, т. е. доступна для редактирования и последующего использования. Показано, что цифровую модель влажности можно получить посредством сопряженного анализа влажности почв с показателями рельефа (основа картографирования – цифровая модель рельефа) и ранжирования типов леса в порядке увеличения влажности почв (основа картографирования – векторный слой таксационных выделов). Результаты картографирования демонстрируются на примере 2 тестовых участков в горной и равнинной местностях. Картографирование влажности почв на основе данных цифровой модели рельефа выполнено для тестового участка, расположенного в Осевом Западно-Саянском округе горно-таежных лесов, где типы леса за счет пространственного сопряженного анализа распределены по показателям рельефа и ранжированы по влажности почв. Результат пространственного анализа цифровой модели рельефа – растр (цифровая модель влажности почв). Картографирование влажности почв по материалам лесоустройства выполнено для тестового участка, представляющего южно-таежные леса Приангарья. Здесь ранжирование влажности почв произведено на основе таксационных описаний выделов тестового участка. Из анализа исключены данные выделов, где произрастание древесных пород априори невозможно (заболоченные местоположения, реки и озера). В упрощенном виде ранжированный ряд влажности почв демонстрируется также относительно типа леса, как обобщенного качественного показателя лесорастительных условий. Вне зависимости от категории земель (насаждение, гарь, вырубка) каждый таксационный выдел получает дополнительный количественный показатель влажности почвы с последующей возможностью определения по уравнениям регрессии потенциальной продуктивности древесных пород. Установлено, что при наличии векторного слоя лесоустроительных данных картографирование влажности почв предпочтительнее производить на основе материалов лесоустройства. Показано, что существует зависимость продуктивности древостоев от влажности почв.

Для цитирования: Фарбер С.К., Кузьмик Н.С. Формирование цифровой модели влажности почв на основе показателей рельефа местности и по материалам лесоустройства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 53–67. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-53-67

Ключевые слова: влажность почв, рельеф местности, тип леса, класс бонитета, потенциальная продуктивность древостоев, картографирование влажности почв.

Введение

В сельскохозяйственном производстве влагообеспеченность почв контролируется при выполнении текущих мероприятий и прогнозировании урожайности посевов. Оценка осуществляется в порядке агрометеорологического мониторинга и основана на наблюдениях, проводимых на станциях Росгидромета. Практикуется также оценка с использованием средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при определении относительной влажности верхнего слоя почвы [3]. В основе дистанционных методов лежит применение излучения и отражения почвой электромагнитной радиации. На качество дистанционных оценок существенно влияет состояние атмосферы, растительный покров и др. Надежные результаты могут быть получены лишь при комплексном использовании дополняющих друг друга методов [9]. Сдерживают применение дистанционных методов низкое пространственное разрешение ДЗЗ и невозможность непосредственного снятия данных о влажности почв. Напротив, традиционные наземные измерения с помощью приборов обеспечивают высокую точность результатов, но неэффективны для больших площадей и труднодоступных территорий. Представляется, что более перспективна оценка влажности почв по ДЗЗ, поэтому соотношение между наземными и дистанционными методами должно смещаться в сторону последних. Однако полностью исключить наземные методы вряд ли возможно. Для методов ДЗЗ, как минимум, требуется верификация, которая основана на использовании данных натурного обследования.

Для лесохозяйственного производства при выращивании высокопродуктивных насаждений влажность почв имеет первостепенное значение. Наряду с плодородием и теплообеспеченностью участка она является показателем лесорастительных условий, лимитирующим произрастание древесных пород. Относительная оценка влажности почв фигурирует в описании таксационного выдела, т. е. наряду с другими таксационными показателями выдела определяется в процессе массовой таксации. В классификации по типам условий произрастания (ТУМ) влажность почв используется в качестве входного показателя. Принято пять градаций гидротопов почв: 0 – очень сухие; 1 – сухие; 2 – свежие; 3 – влажные; 4 – сырые; 5 – болотистые. На эдафо-фитоценологических векторах типов леса В.Н. Сукачева также четко прослеживается изменение влажности почв.

Влажность лесных почв отслеживается методами, аналогичными методам для сельскохозяйственных почв, т. е. с помощью приборов наземного использования и ДЗЗ. Однако леса занимают значительно большие площади, поэтому ведение мониторинга в них наземными приборами еще более проблематично, а из-за маскирующего влияния лесного полога мониторинг на основе ДЗЗ менее точен, чем для открытых пространств сельскохозяйственных полей.

Кроме наземных и дистанционных методов существует возможность косвенной оценки влажности почв на основе известных характеристик экосистем, в том числе характеристик лесов и местоположений (рельефа местности). Сопряженность растительных сообществ с условиями среды выявляется за счет применения методов ординации, позволяющих упорядочивать объекты изучения вдоль каких-либо осей, определяющих варьирование характери-

стик растительного покрова [1, 13 и др.]. Фитоценозы по свойственным им признакам или экотопу размещают в системе координат [12]. Дальнейшее картографирование позволяет выявлять пространственно-географическую структуру, изучать взаимосвязи и взаимозависимости в объектах [2].

Вопросы генезиса почв, взаимосвязи его с показателями рельефа обсуждаются многими авторами [5, 8 и др.]. Проблема бонитировки лесных почв рассматривается в работах В.Д. Зеликова [6, 7 и др.]. Изучается связь таксационных показателей древостоев с условиями местопроизрастания, предлагается использование ландшафтного подхода [26, 35, 37]. Устанавливаются зависимости между классами бонитета, типами леса, ландшафтами и таксационными показателями насаждений [33, 36]. Современные методы обработки данных и картографирования предоставляют дополнительные возможности анализа [21–30, 32, 34 и др.].

Взаимосвязи типов растительного покрова с показателями климата обсуждаются в работах Н.П. Поликарпова и др. [11], В.А. Шкляева и др. [20], В.П. Седельникова и др. [14]. К сожалению, эмпирические данные о количестве влаги на тестовых участках, которые при этом относились бы к определенной форме рельефа и типу леса, отсутствуют.

Цель исследования – демонстрация возможности картографирования влажности почв на основе данных цифровой модели рельефа (ЦМР – SRTM) и описаний таксационных выделов, а также выявление зависимости продуктивности древостоев от влажности почв.

Объекты и методы исследования

Различают прямые и непрямые методы ординации. В настоящее время более популярны методы непрямого многомерного статистического анализа [10]. Метод прямого анализа применяется, когда четко выражен ведущий фактор, который несложно измерить. Из этого следует, что сам факт наличия для настоящей работы данных массовой таксации и данных ЦМР определяет выбор метода – прямая ординация.

Работа выполнена с использованием программных средств ArcGIS Spatial Analyst. Выявление аналитического вида уравнений регрессии произведено программными средствами Statistika.

Картографирование влажности почв на основе ЦМР. Тестовый участок расположен в горах Южной Сибири и занимает северо-восточную часть Осевого Западно-Саянского округа горно-таежных лесов (рис. 1). Территория отвечает требованиям однородности рельефа и природно-климатических показателей. Лесные сообщества тестового участка в закономерном порядке произрастают на местоположениях, к лесорастительным условиям которых они эволюционно приспособлены.

Для получения показателей рельефа использованы данные матрицы SRTM [31]. Основные показатели рельефа – абсолютная высота, экспозиция и уклон местности. Пространственный анализ ЦМР произведен средствами ГИС (использован модуль ArcGIS Spatial Analyst). Для индексации местоположений приняты следующие входы:

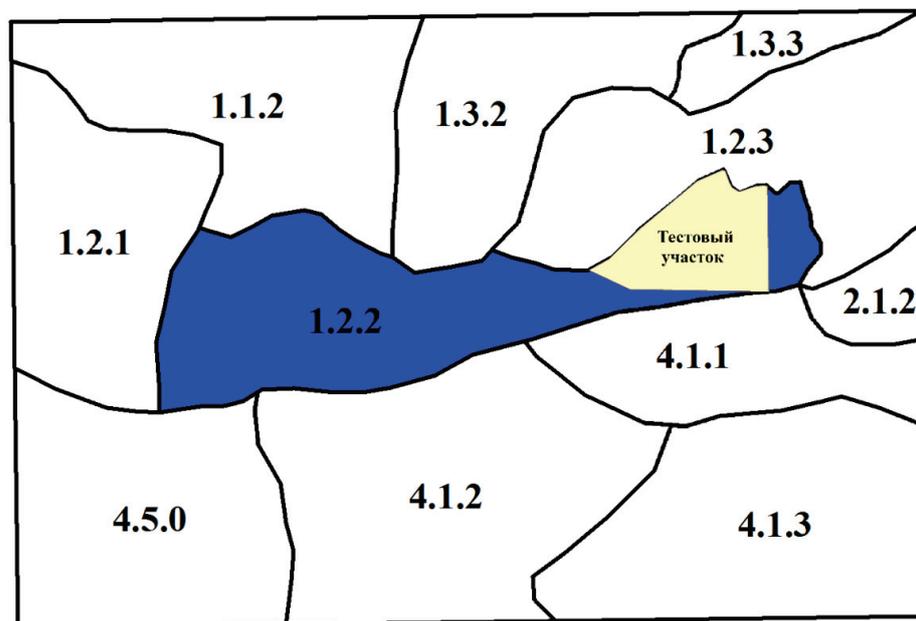


Рис. 1. Тестовый участок на фоне лесорастительного районирования гор Южной Сибири [15] (нумерация таксонов районирования сохранена; Осевой Западно-Саянский округ – 1.2.2)

Fig. 1. The test area against the background of forest site zoning of the Southern Siberia mountains [15] (numeration of zoning taxa is preserved; Axial Western Sayan district – 1.2.2)

абсолютные высоты (градация 100 м с образованием 12 высотных поясов);

склоны северной экспозиции (0...90, 270...360°);

склоны южной экспозиции (90...270°);

плоские местоположения (поймы водотоков и водоразделы);

склоны средней крутизны (3...20°);

крутые склоны (более 20°).

Первому высотному поясу отвечают высоты до 900 м, второму – 901...1000 м и т. д., последний (двенадцатый пояс) занимает высоты более 1901 м. Северная экспозиция обозначена 1, южная – 2. Уклоны менее 3° обозначены индексом 1, менее 20° – 2, более 20° – 3. Две градации экспозиции и три градации уклонов образуют 6 типов местоположений. Результатом пространственного анализа показателей рельефа является получение растровых поверхностей абсолютных высот, экспозиций и уклонов местности. За счет их комбинирования формируется общая растровая поверхность *Combine* (цифровая модель рельефа, объединяющая группы высот, экспозиций и уклонов). В атрибутивной таблице растра *Combine* создается поле ВЭУ (высота, экспозиция, уклон) со значениями индексов местоположений. Далее поле ВЭУ используется в качестве ключевого для связи с атрибутивной таблицей пространственного распределения влажности почв [17].

Для отдельных местоположений по значениям годового количества осадков производится расчет уравнений регрессии $ОСАДКИ = f(H)$, где *ОСАДКИ* – годовое количество осадков, мм/год; *H* – абсолютная высота, м.

При статистически недостаточной корреляции между переменными количество осадков в качестве измерителя влаги использовать нельзя. Требуется другой показатель. Альтернативой может служить индекс влажности почв, который в экспертном порядке можно определить для каждого типа леса. Ранжирование типов леса от сухих местоположений к более влажным производится с учетом почвообразующей породы, названия почвы, перечня видов растительности. Порядковый номер в ранжированном ряду типов леса отождествляется с индексом влажности. Далее по местоположениям формируются уравнения регрессии $ВЛАЖНОСТЬ = f(H)$, которые при наличии достоверной связи используются для расчета значений поля влажности в таблице *dBASE*. Создание растровой поверхности (цифровой модели влажности почв) представляет собой операцию соединения таблицы *dBASE* с атрибутивной таблицей раstra местоположений по ключевому полю ВЭУ [17]. Соответственно, цифровая модель влажности почв получается в виде раstra.

Картографирование влажности почв на основе данных описаний таксационных выделов. Тестовый участок расположен в Красноярском Приангарье (Эвенкийский автономный округ) на территории Терянского лесничества (Верхнетерянского участкового лесничества, квартала 1–53 и Кажимское участковое лесничество, квартала 93, 94, 118, 119) (рис. 2). Исходные материалы – данные массовой таксации (1765 описаний таксационных выделов).

Эвенкийский автономный округ (Байкитское лесничество)

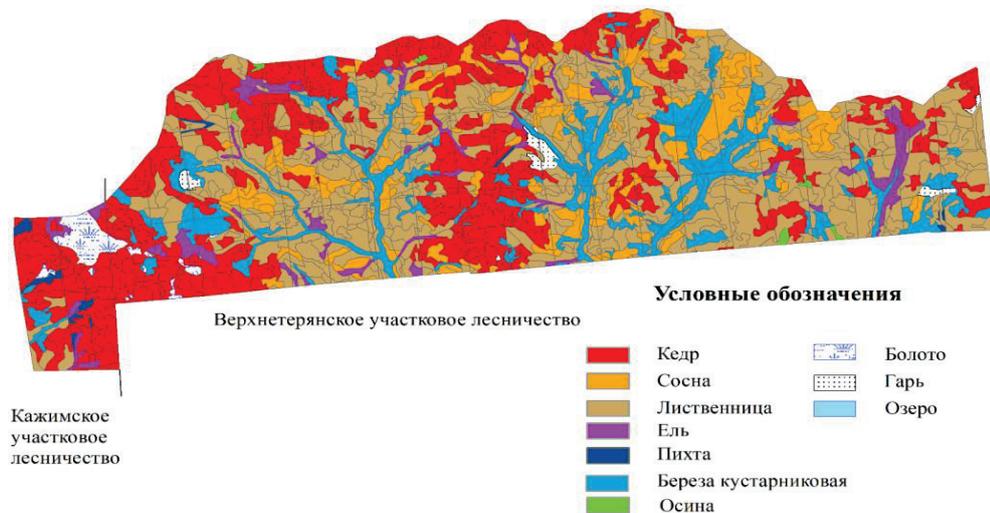


Рис. 2. Породный состав тестового участка южно-таежных лесов Красноярского Приангарья

Fig. 2. The species composition of the test area of the southern taiga forests of the Krasnoyarsk Angara region

Влажность почв определяется в экспертном порядке. По описанию лесотаксационных выделов производится их сопоставление по влажности с получением ранжированного (по степени влажности) ряда типов леса. Увеличение порядкового номера идет в ряду от сухих к более увлажненным местоположениям [18]. Оценка комплексная, принимается во внимание информация из таксационного описания насаждений и макета дополнительных сведений.

Оценка влажности почв требуется для всех лесотаксационных выделов, включая лиственные насаждения. Для выделов погибших насаждений влажность определяется в сравнении с насаждениями, занимающими аналогичные местоположения [16]. Далее влажность используется в качестве независимой переменной (например, в уравнениях продуктивности древесных пород). Индекс влажности вносится в отдельное поле атрибутивной таблицы таксационных выделов, что обеспечивает возможность последующего картографирования. Соответственно, цифровая модель влажности почв получается в векторном виде.

Результаты исследования и их обсуждение

Картографирование влажности почв на основе ЦМР (SRMT) на примере тестового участка гор Южной Сибири. Диагностические таблицы типов леса дают необходимое представление о модификациях лесных формаций и содержат информацию о почвенно-грунтовых отличиях, степени увлажнения почв, их распределении по абсолютным высотам и формам рельефа. Наиболее удачный вариант типологической структуризации лесов гор Южной Сибири содержится в монографии [15], однако и в ней далеко не полностью отражается типологическое разнообразие насаждений. На примере лесов Каахемского лесорастительного округа исследованиями С.К. Фарбера с соавторами [19] демонстрируется наличие пробелов в лесотипологических характеристиках растительного покрова. По данным В.И. Власенко [4] в Осевом и Хемчикско-Куртушубинском округах не указаны кустарниковые серии ассоциаций, а также им выявлена необоснованность выделения в высотнопоясном комплексе (ВПК) перистепных лиственничных лесов, горно-таежных травянистых лиственничных лесов и их объединения в подтаежно-лесостепной ВПК.

Диагностическая таблица типов леса Осевого Западно-Саянского округа, в котором расположен тестовый участок, соответствует современной лесотаксационной структуре. В лесотипологическом отношении леса округа не отличаются разнообразием. При другом сочетании тепла и влаги характеристики лесов и их типологическая структура будут иными. Поэтому для построения ранжированного по влажности ряда типов леса необходимы дополнительные данные, на основе которых выявляется соответствие характеристик климата растительному покрову. Для получения этих данных к анализу были привлечены типы леса смежных лесорастительных округов: Каахемского (подтаежных лиственничных и горно-таежных кедрово-лиственничных лесов), Усинского (лесостепных лиственничных и горно-таежных лиственничных и кедровых лесов), Улугхемского котловинно-степного округа (островных сосновых боров) [15]. Табличные данные типов леса на основе литературных источников дополнены климатическими характеристиками [11, 14], установлена их сопряженность с показателями рельефа местности. Так, в Каахемском округе ельники с пихтой крупнотравно-зеленомошными (Е(П). крт. зм.) произрастают в долинах рек на высотах до 900 м, сумма температур выше 10 °С – 1225 °С, годовое количество осадков – 525 мм (табл. 1, 2).

Таблица 1

Показатели тепла и влаги типов лесов (Каахемский лесорастительный округ, фрагмент)

Тип леса	Сумма температур >10 °С, °С	Годовое количество осадков, мм
Березняк: осочково-вейниковый (Б(Л).осч.в.)	1625	575
спирейно-осочковый (Б.сп.осч.)	1375	525
Лиственничник: типчакково-разнотравно-осочковый (Л.тип.рт.-осч.)	1625	425
ирисово-осочковый (Л.ир.осч.)	1625	575
ирисово-разнотравный (Л.ир.рт.)	1625	525
ирисово-спирейно-крупнотравный (Л.ир.сп.крт.)	1525	475
с пихтой зеленомошно-брусничный (Л(П)зм.бр.)	1150	775
Осинник: хвощево-осочковый (Ос.хв.осч.)	1625	675
спирейно-крупнотравно-осочковый (Ос.сп.крт.осч.)	1675	757
Ельник: с пихтой крупнотравно-зеленомошный (Е(П).крт.зм.)	1275	525
с лиственницей хвощевый (Е(Л)хв.)	1225	575
с лиственницей бруснично-сфагновый (Е(Л)бр.сф.)	1225	550
осочково-сфагновый (Е.ос.сф.)	1225	550
Кедровник с елью зеленомошно-багульниковый (К(Е)зм.баг.)	950	675

Таблица 2

Распределение типов леса по местоположениям (Каахемский лесорастительный округ, фрагмент)

Абсолютная высота, м	Плоские местоположения (0...3°)		Склоны	
	Долины	Водоразделы	северные	южные
801...900	Е(П)крт.зм.		Б(Л)осч.в. Е(П)крт.зм.	Б(Л)осч.в.
901...1000	Л.ир.сп.крт.	Л.ир.рт.	Л.тип.рт.осч. Л.ир.осч. Ос.хв.осч. Ос.сп.крт.осч.	Ос.сп.крт.осч.
1001...1100	Л.ир.сп.крт. Е(Л)хв. Е(Л)бр.сф. Е.ос.сф.	Б.сп.осч	Б.сп.осч Л(П)зм.бр. К(Е)зм.баг.	–

Примечание. Полное название типов леса приведено в табл. 1.

Коэффициент корреляции r между годовым количеством осадков и абсолютными высотами: плоские местоположения – 0,401; северные склоны – 0,256; южные склоны – 0,094. Тенденция увеличения количества осадков

с высотой местности выражена недостаточно. Линии уравнений регрессии для отдельных местоположений имеют разнонаправленные наклоны к оси абсцисс. Отсюда следует, что уравнения регрессии $ОСАДКИ = f(H)$ для формирования растровой поверхности влаги не подходят.

Альтернативным показателем годовому количеству осадков является индекс влажности. Типы леса Осевого, Улугхемского, Усинского и Казахемского лесорастительных округов были ранжированы в порядке увеличения влажности. В полученном ряду каждый следующий тип леса более влажный в сравнении с предыдущим (табл. 3). Основанием для экспертного ранжирования типов леса по влажности служили лесорастительные условия, таксационные показатели, доминантные виды травяно-кустарничкового яруса и их отношение к условиям произрастания.

Таблица 3

Ранжированный по влажности ряд типов леса (фрагмент)

Тип леса	Группа влажности почв	Влажность почв, %
Кедровник ольховниково-мшистый (К.ольх.-мш.)	Сырая	74
Кедровник ольховниково-мшистый (К.ольх.-мш.)	Сырая	75
Ельник бруснично-сфагновый (Е(Л)бр.-сф.)	Сильно влажная	76
Кедровник багульниково-сфагновый (К.баг.-сф.)	Сильно влажная	77

На основе данных сопряженности типов леса с показателями рельефа и высотами местности (табл. 2) рассчитаны зависимости влажности местоположений от абсолютных высот: $ВЛАЖНОСТЬ = f(H)$ (табл. 4).

Таблица 4

Взаимосвязь влажности почвы с абсолютными высотами H по местоположениям

Местоположение	$ВЛАЖНОСТЬ = f(H)$
Поймы и водоразделы	$y = 0,0444x - 0,7971; r = 0,561$
Северные склоны (3–20)°	$y = 0,0401x - 11,792; r = 0,548$
Северные склоны более 20°	$y = 0,0366x - 11,251; r = 0,568$
Южные склоны (3–20)°	$y = 0,0358x - 15,152; r = 0,726$
Южные склоны более 20°	$y = 0,0288x - 13,854; r = 0,723$

Оказалось, что линии, построенные по этим уравнениям располагаются в закономерном порядке. Наблюдается возрастание влажности по мере увеличения высот местности. Линии не разнонаправлены, т. е. их углы с осью абсцисс различаются незначительно. Коэффициенты корреляции r значимы (0,548–0,726). Отсюда следует, что индекс влажности можно использовать для получения растровой поверхности.

Расстояние между линиями $ВЛАЖНОСТЬ = f(H)$ различно, что может являться следствием как неточности исходных для построения уравнений данных, так и особенностей распределения по формам рельефа почвенного слоя, который формировался в силу специфики естественно-исторических причин. При любом варианте несовпадение расстояний между линиями не позволяет воспользоваться общим для всех местоположений уравнением ре-

грессии. Значения индексов влажности местоположений, рассчитанные по уравнениям табл. 4, занимают соответствующее поле таблицы *dBASE*. В результате соединения с атрибутивной таблицей *Combine* получена растровая поверхность влажности (рис. 3).

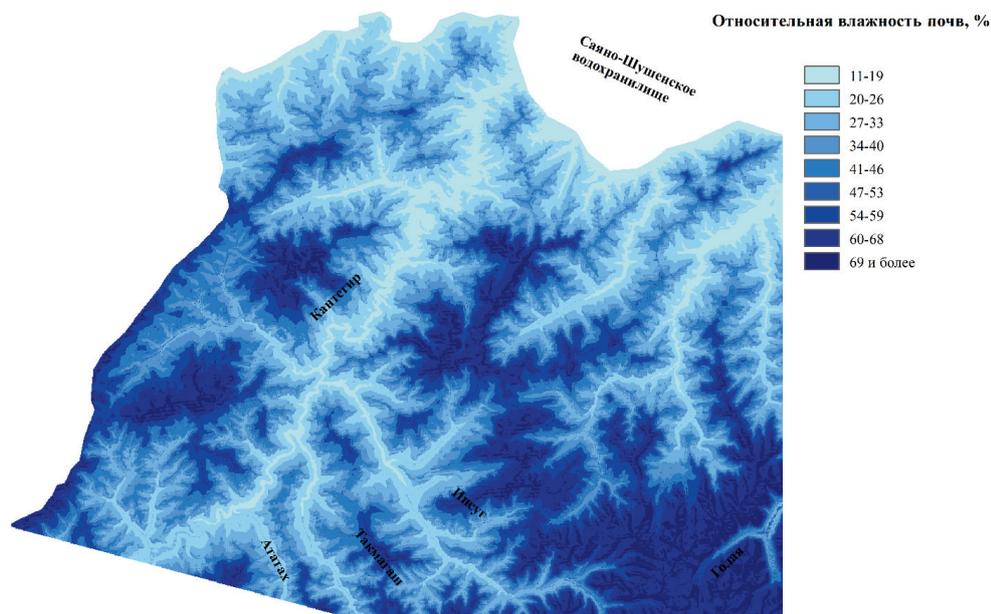


Рис. 3. Растровая поверхность влажности почв тестового участка в горах Южной Сибири

Fig. 3. Raster surface of the test area soil moisture in the mountains of Southern Siberia

Картографирование влажности почв на основе данных описаний таксационных выделов на примере тестового участка южно-таежных лесов Приангарья. Влажность почв получена в результате экспертного ранжирования типов леса. Порядковый номер в ряду (с 1 по 12) рассматривается в качестве индекса влажности почв. Информация для анализа – тип леса, породный состав, класс бонитета, почва (название, механический состав, степень влажности). В упрощенном виде ранжированный ряд влажности почв демонстрируется относительно обобщенного качественного показателя лесорастительных условий – типа леса (табл. 5).

Влажность почв определена для всех лесотаксационных выделов, включая лиственные насаждения (рис. 4).

Выявлено, что теснота связи влажности почв с продуктивностью сосновых, лиственных и еловых древостоев умеренная, а с продуктивностью кедровых – слабая. Поэтому влажность почв подлежит учету в качестве аргумента модели потенциальной продуктивности древостоев. Рассчитаны зависимости продуктивности B_w (класса бонитета) пород деревьев от влажности почв W , где R – коэффициент множественной корреляции лесорастительных условий с показателями рельефа:

Таблица 5

Распределение типов леса по влажности почв

Древостой	Индекс влажность почв												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Сосняк	лш	лшбр	брзм	брос, бррт	ос, ртос	чзм							
Лиственничник					брзм, брос, бррт	ос, ртос	чзм	хвв, хвзм	осдм	бгол			
Кедровник						бррт, брос, брзм	ртос, ос	чзм	хвзм	осдм	бгол		бгсф
Ельник							бррт	ртос	хвв, хвзм	осдм	бгол		бгсф
Пихтарник								ртос, ос	хвзм	осдм			
Березняк			брзм	бррт	ртос	ос	чзм	хвзм	осдм	бгол			
Осинник						ос	чзм						

Примечание. лш – лишайниковый; лшбр – лишайниково-брусничный; брзм – бруснично-зеленомошный; брос – бруснично-осочковый; бррт – бруснично-разнотравный; ос – осочковый; ртос – разнотравно-осочковый; чзм – чернично-зеленомошный; хвв – хвощово-вейниковый; хвзм – хвощово-зеленомошный; осдм – осоково-долгомошный; бгол – багульниково-ольховниковый); бгсф – багульниково-сфагновый.

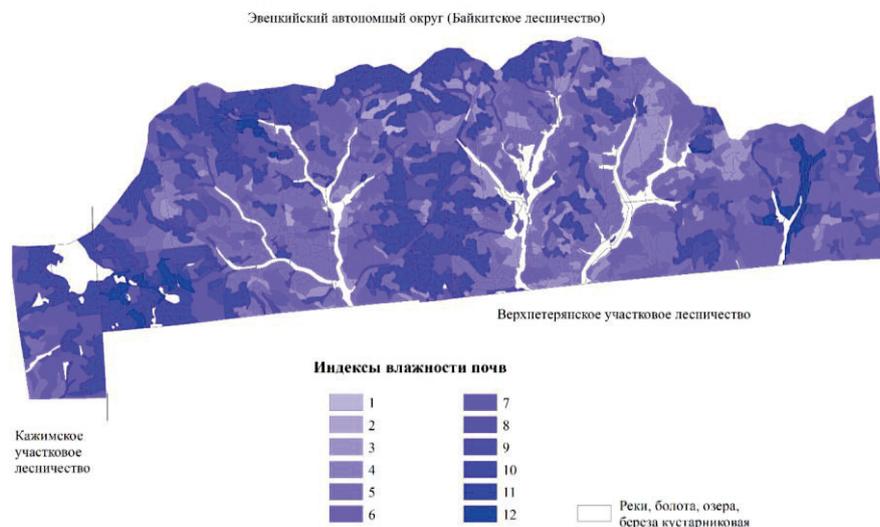


Рис. 4. Векторный слой индексов влажности почв тестового участка южно-таежных лесов Красноярского Приангарья

Fig. 4. A feature layer of the soil moisture indices of the test area of the southern taiga forests of the Krasnoyarsk Angara region

сосняки – $B_w = 5,804 - 1,073W + 0,116W^2$ ($R = 0,369$, $R^2 = 0,136$);

лиственничники – $B_w = 6,004 - 0,920W + 0,068W^2$ ($R = 0,406$, $R^2 = 0,164$);

кедровники – $B_w = 6,234 - 0,543W + 0,033W^2$ ($R = 0,169$, $R^2 = 0,028$);

ельники – $B_w = 0,905 + 0,351W$ ($R = 0,660$, $R^2 = 0,436$).

Насаждения тестового участка произрастают при определенной влажности. Сосняки занимают местоположения с индексами влажности от 1 до 7; лиственничники – от 5 до 10; кедровники – от 6 до 12; ельники – от 7 до 12. Еще более влажные местоположения захватывают заболоченные кустарники. Таким образом, влажность лимитирует возможность произрастания пород деревьев, и этот факт далее следует учитывать при картографировании потенциальной продуктивности древесных пород. Так, местоположения с индексами влажности 1–6, 11 и более в качестве потенциально возможных для произрастания лиственницы выпадают. Расчетные значения B_w внесены в отдельные поля атрибутивной таблицы таксационных выделов, что позволяет получить их в картографическом виде.

Выводы

1. Влажность почв подлежит учету не только в лесном хозяйстве (для проектирования хозяйственных мероприятий), но и в целом для решения задач природопользования и экологического мониторинга. В настоящее время для оценки влажности почв используются наземные и дистанционные методы. Существует также возможность косвенной оценки, которая осуществляется посредством методов ординации. В качестве показателей, которые косвенно отражают влажность почв, рассматриваются таксационные показатели выделов и показатели рельефа местности. Установлено, что существует два подхода к решению задачи: на основе данных цифровой модели рельефа и на основе данных описаний таксационных выделов. В горных условиях, когда формы рельефа хорошо дифференцированы, для выявления влажности почв

можно использовать как тот, так и другой подход. В равнинных условиях предпочтительнее подход на основе данных описаний таксационных выделов. В целом же картографирование на основе материалов лесоустройства менее трудоемкое.

2. На примере тестового участка в горах Южной Сибири по данным ЦМР (SRTM) сформирована цифровая модель влажности в виде растрового изображения. На примере тестового участка южно-таежных лесов Приангарья по данным описаний таксационных выделов сформирована цифровая модель влажности в виде векторного слоя. Подтверждено, что существует зависимость продуктивности древостоев от влажности почв.

3. Осадки перераспределяются по формам рельефа и формируют влажность почв. В свою очередь влажность почв является фактором, лимитирующим произрастание древесных пород. Атрибутивная таблица таксационных выделов дополняется полем влажности. При изменении описаний насаждений сохраняется возможность редактирования в атрибутивной таблице индекса влажности почв и актуализации картографических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александров В.Д. Классификация растительности // Обзор принципов классификации и классификационных систем в разных геоботанических школах. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1969. 275 с. [Aleksandrova V.D. *Vegetation Classification. An Overview of the Principles of Classifying and Classification Systems in Different Geobotanical Schools*. Leningrad, Nauka Publ., 1969. 275 p.]
2. Берлянт А.М. Образ пространства: карта и информация. М.: Мысль, 1986. 240. [Berlyant A.M. *Image of Space: Map and Information*. Moscow, Mysl' Publ., 1986. 240 p.]
3. Быков Ф.Л., Василенко Е.В., Гордин В.А., Тарасова Л.Л. Анализ влажности почвы по данным наземной сети и дистанционного спутникового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: тез. докл. XIV Всерос. открытой конф., 14–18 ноября 2016 г. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 334. [Bykov F.L., Vasilenko E.V., Gordin V.A., Tarasova L.L. Soil Moisture Analysis Based on Ground Network and Remote Satellite Sensing Data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space: Abstracts of the 14th All-Russian Open Conference, November 14–18, 2016*. Moscow, IKI RAS Publ., 2016, p. 334].
4. Власенко В.И. Структура и динамика лесной растительности заповедных территорий Алтае-Саянской горной страны. М.: МСОП, 2003. 484 с. [Vlasenko V.I. *Structure and Dynamics of Forest Vegetation in Protected Areas of the Altai-Sayan Mountain Country*. Moscow, IUCN Publ., 2003. 484 p.]
5. Зайцев Б.Д. Почвоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 369 с. [Zaytsev B.D. *Soil Science*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 369 p.]
6. Зеликов В.Д. Из опыта работ по картированию лесных почв // Лесн. хоз-во. 1962. № 9. С. 47–50. [Zelikov V.D. By Mapping Experience of Forest Soils. *Lesnoye khozyaystvo*, 1962, no. 9, pp. 47–50].
7. Зеликов В.Д. Имитационные модели лесных почв. М.: МЛТИ, 1991. 76 с. [Zelikov V.D. *Forest Soil Simulation Models*. Moscow, MLTI Publ., 1991. 76 p.]
8. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во МГУ, 1977. 312 с. [Karpachevskiy L.O. *Mixed Character of Soil Cover in Forest Biogeocenosis*. Moscow, MGU Publ., 1977. 312 p.]
9. Мамаева М.А. Определение запасов влаги в почве дистанционными методами зондирования: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2004. 23 с. [Mamaeva M.A. *Determination of Soil Moisture Reserves by Remote Sensing Techniques: Cand. Phys. Math. Sci. Diss. Abs.* Saint Petersburg, 2004. 23 p.]

10. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Наука о растительности (история и современное состояние основных концепций). Уфа: Гилем, 1998. 413 с. [Mirkin B.M., Naumova L.G. *Vegetation Science (History and Current State of Basic Concepts)*. Ufa, Gilem Publ., 1998. 413 p.]

11. Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 225 с. [Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I. *Climate and Mountain Forests of Southern Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 225 p.]

12. Работнов Т.А. Фитоценология. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1983. 296 с. [Rabotnov T.A. *Phytocoenology*. Moscow, MGU Publ., 1983. 296 p.]

13. Раменский Л.Г. Избранные работы: Проблемы и методы изучения растительного покрова. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1971. 334 с. [Ramenskiy L.G. *Selected Papers: Problems and Methods of Vegetation Cover Study*. Leningrad, Nauka Publ., 1971. 334 p.]

14. Седельников В.П., Лапишина Е.И., Королюк А.Ю., Валуцкий В.И., Ермаков Н.Б., Ершова Э.А., Макунина Н.И., Мальцева Т.В. Среднемасштабное картирование растительности гор Южной Сибири // Сиб. экол. журн. 2005. № 6. С. 939–953. [Sedel'nikov V.P., Lapshina E.I., Korolyuk A.Yu., Valutskiy V.I., Ermakov N.B., Ershova E.A., Makunina N.I., Mal'tseva T.V. Middle-Scale Vegetation Mapping in the Mountains of Southern Siberia. *Sibirskiy Ekologicheskij Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2005, no. 6, pp. 939–953].

15. Смагин В.Н., Ильинская С.А., Назимова Д.И., Новосельцева И.Ф., Чередникова Ю.С. Типы лесов гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 334 с. [Smagin V.N., Il'inskaya S.A., Nazimova D.I., Novosel'tseva I.F., Cherednikova Yu.S. *Forest Types of the Mountains of Southern Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 334 p.]

16. Фарбер С.К. Лесные измерения по среднемасштабным аэроснимкам. Красноярск: Изд-во СО РАН, 1997. 106 с. [Farber S.K. *Forest Measurements by Medium-Scale Aerial Images*. Krasnoyarsk, SO RAN Publ., 1997. 106 p.]

17. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., Кошкарлова В.Л. Создание цифровой модели влажности почв (на примере лесных земель гор Южной Сибири) // Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью: сб. материалов XIII Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2017», 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск. В 2 т., т. 2. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. С. 204–207. [Farber S.K., Kuzmik N.S., Koshkarova V.L. Development of the Digital Model of Soil Humidity (On the Example of Forest Lands of the Mountains of South Siberia). *The XIII International Exhibition and Scientific Congress "Interexpo GEO-Siberia-2017"*, Novosibirsk, April 17–21, 2017: *Proceedings of the International Science Conference "Economic Development of Siberia and the Far East. Environmental Economics, Land Management, Forest Management and Real Estate Management"*. In 2 vol. Vol. 2. Novosibirsk, SSUGT Publ., 2017, pp. 204–207].

18. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., Кошкарлова В.Л. Создание цифровой модели тепла (на примере лесных земель гор Южной Сибири) // Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью: сб. материалов XIII Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2017», 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск. В 2 т., т. 2. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. С. 250–253. [Farber S.K., Kuzmik N.S., Koshkarova V.L. Development of the Digital Model of Heat (On the Example of Forest Lands of the Mountains of South Siberia). *The XIII International Exhibition and Scientific Congress "Interexpo GEO-Siberia-2017"*, Novosibirsk, April 17–21, 2017: *Proceedings of the International Science Conference "Economic Development of Siberia and the Far East. Environmental Economics, Land Management, Forest Management and Real Estate Management"*. In 2 vol. Vol. 2. Novosibirsk, SSUGT Publ., 2017, pp. 250–253].

19. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С., Мурзакматов Р.Т., Федотова Е.В. Сопряженность элементов рельефа местности с типами лесов (на примере Каахемского лесорастительного округа) // Экосистемы Центральной Азии: исследования, сохранение,

рациональное использование: материалы XI Убсунурского междунар. симп., 3–8 июля 2012 г., Кызыл. Кызыл: РИО Тувинск. гос. ун-та, 2012. С. 425–429. [Farber S.K., Kuzmik N.S., Murzakmatov R.T., Fedotova E.V. Association of Terrain Elements with Forest Types (Case Study of the Kaakhem Forest Site District). *Ecosystems of Central Asia: Research, Conservation and Rational Use. Proceedings of the 11th Ubsunur International Symposium*, Kyzyl, July 3–8, 2012. Kyzyl, RIO TuvSU Publ., 2012, pp. 425–429].

20. Шкляев В.А., Шкляева Л.С., Мандыт Д.К. Особенности пространственного и сезонного изменения температуры воздуха в Республике Тыва // Геогр. вестн. 2010. № 1(12). С. 68–77. [Shklyayev V.A., Shklyayeva L.S., Mandyt D.K. Features of Extensional and Seasonal Change of Temperature of Air at Republic Tyva. *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin], 2010, no. 1(12), pp. 68–77].

21. Aly Z., Bonn F.J., Magagi R. Analysis of the Backscattering Coefficient of Salt-Affected Soils Using Modeling and RADARSAT-1 SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, vol. 45, iss. 2, pp. 332–341. DOI: [10.1109/TGRS.2006.887163](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.887163)

22. Behrens T., Zhu A.-X., Schmidt K., Scholten T. Multi-Scale Digital Terrain Analysis and Feature Selection for Digital Soil Mapping. *Geoderma*, 2010, vol. 155, iss. 3-4, pp. 175–185. DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.07.010](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.07.010)

23. Brungard C.W., Boettinger J.L., Duniway M.C., Wills S.A., Edwards Jr. T.C. Machine Learning for Predicting Soil Classes in Three Semi-Arid Landscapes. *Geoderma*, 2015, vol. 239-240, pp. 68–83. DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.09.019](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.019)

24. Bui E.N. Soil Survey as a Knowledge System. *Geoderma*, 2003, vol. 120, iss. 1-2, pp. 17–26. DOI: [10.1016/j.geoderma.2003.07.006](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.07.006)

25. Donatelli M., Stöckle C., Costantini E. A., Nelson R. SOILR: A Model to Estimate Soil Moisture and Temperature Regimes. *Proceedings of the ISSS Congress*. Montpellier, France, 1998.

26. *Ecology of Hierarchical Landscapes: From Theory to Application*. Ed. by J. Chen, S.C. Saunders, K.D. Brosofske, T.R. Crow. New York, Nova Science Publishers, 2006. 311 p.

27. Florinsky I.V. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*. Amsterdam, Academic Press, 2012. 432 p. DOI: [10.1016/C2010-0-65718-X](https://doi.org/10.1016/C2010-0-65718-X)

28. Gooley L., Huang J., Pagé D., Triantafilis J. Digital Soil Mapping of Available Water Content Using Proximal and Remotely Sensed Data. *Soil Use and Management*, 2014, vol. 30, iss. 1, pp. 139–151. DOI: [10.1111/sum.12094](https://doi.org/10.1111/sum.12094)

29. Grunwald S. Multi-Criteria Characterization of Recent Digital Soil Mapping and Modeling Approaches. *Geoderma*, 2009, vol. 152, iss. 3-4, pp. 195–207. DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.06.003](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.003)

30. Grunwald S., Thompson J.A., Boettinger J.L. Digital Soil Mapping and Modeling at Continental Scales: Finding Solutions for Global Issues. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, vol. 75, iss. 4, pp. 1201–1213. DOI: [10.2136/sssaj2011.0025](https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0025)

31. Karwel A.K., Ewiak I. Estimation of the Accuracy of the SRTM Terrain Model on the Area of Poland. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing, 2008, vol. XXXVII, part B7, pp. 169–172.

32. Lagacherie P., McBratney A.B. Chapter 1 Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. *Developments in Soil Science*. 2006, vol. 31, pp. 3–22. DOI: [10.1016/S0166-2481\(06\)31001-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31001-X)

33. Lefsky M.A., Turner D.P., Guzy M., Cohen W.B. Combining Lidar Estimates of Aboveground Biomass and Landsat Estimates of Stand Age for Spatially Extensive Validation of Modeled Forest Productivity. *Remote Sensing of Environment*, 2005, vol. 95, iss. 4, pp. 549–558. DOI: [10.1016/j.rse.2004.12.022](https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.022)

34. McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B. On Digital Soil Mapping. *Geoderma*, 2003, vol. 117, iss. 1-2, pp. 3–52. DOI: [10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
35. *Patterns and Processes in Forest Landscapes*. Ed. by R. Laforteza, J. Chen, G. Sanesi, Th.R. Crow. Netherlands, Springer, 2008. 425 p. DOI: [10.1007/978-1-4020-8504-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8504-8)
36. Rennie P.J. Methods of Assessing Site Capacity. *The Commonwealth Forestry Review*, 1963, vol. 42, no. 4(114), pp. 306–317.
37. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Ed. by J.P. Wilson, J.C. Gallant. John Wiley & Sons, 2000. 520 p.

FORMATION OF A DIGITAL ELEVATION MODEL OF SOIL MOISTURE ADOPTED FROM TERRAIN PARAMETERS AND FOREST MANAGEMENT MATERIALS

S.K. Farber, *Doctor of Agriculture*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-3013>

N.S. Kuzmik, *Candidate of Agriculture*; *ResearcherID*: [V-6094-2019](https://orcid.org/0000-0003-4707-9011),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4707-9011>

Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS”, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: sfarber@ksc.krasn.ru, kuzmik@ksc.krasn.ru

The visibility of the spatial distribution of soil moisture is achieved through mapping, which is most simply carried out according to a digital model. Information on soil moisture is stored in the attribute table field of the Geographic Information System (GIS) layer and available for editing and later use. It is shown that a digital moisture model can be obtained through the cross-spectrum analysis of soil moisture with terrain parameters (frame of mapping – a digital elevation model) and ranking of forest types in order of increasing soil moisture (frame of mapping – a feature layer of inventory plots). The mapping results are demonstrated in terms of 2 test sites in mountainous and flat areas. Soil moisture mapping based on the DEM (digital elevation model) data was performed for a test site located in the Axial Western Sayan district of the mountain taiga forests; where forest types, due to the spatial cross-spectrum analysis, are distributed by terrain parameters and ranked by soil moisture. The result of the spatial analysis of the DEM is a raster (digital elevation model of soil moisture). Soil moisture mapping based on the forest management materials is performed for the test area representing the southern taiga forests of the Angara region. Ranking of soil moisture is made on the basis of inventory plot descriptions of the test site. The data of inventory plots was excluded from the analysis. Growth of tree species is a priori impossible down there (wetlands, rivers and lakes). In a simplified form, a ranked range of soil moisture is also demonstrated relative to the forest type as a generalized qualitative indicator of forest site conditions. Regardless of the land category (plantation, burnt area or cutover), each inventory plot receives an additional quantitative indicator of soil moisture, followed by the possibility of determining the regression equations for the potential productivity of tree species. It is found that in the presence of a feature layer of forest management data, soil moisture mapping is preferable to be adapted from the forest management materials. It is shown that there is a dependence of the productivity of stands on soil moisture.

For citation: Farber S.K., Kuzmik N.S. Formation of a Digital Elevation Model of Soil Moisture Adopted from Terrain Parameters and Forest Management Materials. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 53–67. DOI: [10.37482/0536-1036-2020-4-53-67](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-53-67)

Keywords: soil moisture, terrain, forest type, quality class, potential productivity of forest stands, mapping of soil moisture.

Поступила 10.07.19 / Received on July 10, 2019