

В.В. Скрипко, С.Г. Платонова, Т.О. Стрельникова, Ю.А. Манаков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ОТВАЛАХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ



Введение

Проблема восстановления земель после разработки месторождений полезных ископаемых является одной из наиболее актуальных прикладных и фундаментальных проблем геоэкологии в начале двадцать первого века. Необходимость ее решения вызвана современными экологическими и социально-экономическими требованиями развития горнодобывающих регионов, где огромные площади нарушены, в том числе заняты породными отвалами. Успешная рекультивация отвалов во многом зависит от выбора подходящих ее видов, а также методов и подходов к ее реализации.

В настоящей работе на примере одного из транспортных отвалов Красногорского угледобывающего разреза (площадью около 140 га), расположенного в южной части Кемеровской области, было выполнено моделирование экологических параметров с использованием ГИС-технологий для выделения участков, отличающихся по степени благоприятности условий восстановления растительного покрова, с целью повышения эффективности рекультивационных мероприятий.

Кемеровская область, расположенная на юге Сибири (рис. 1), относится к регионам с интенсивным развитием угледобывающей промышленности. Породные отвалы, образованные при открытой добыче угля, занимают здесь огромные площади (34,3 тыс. га) [9]. К тому же в последние годы наметилась тенденция к переходу преимущественно на открытый способ отработки угольных месторождений и, соответственно, увеличению площадей, занятых отвалами.

В природном отношении южная часть Кемеровской области характеризуется континентальным климатом со значительными годовыми и суточными колебаниями температур. Это обусловлено не только

расположением территории внутри азиатского континента, но и ее региональной позицией.

Южная часть Кемеровской области находится в низкоргорной части горно-таежного пояса на восточных склонах гор Кузнецкого Алатау в зоне сочленения их с Кузнецкой межгорной котловиной, а также горными сооружениями Салаира и Горной Шории. Радиационный баланс территории положителен в течение 8 месяцев. Среднегодовая температура составляет 0,0 °С; средняя температура самого холодного месяца, января, –19,5 °С; самого теплого месяца, июля, +18,5 °С. Количество осадков в зоне горных черневых лесов достигает 600–800 мм в год [1]. Иначе говоря, фоновые климатические условия в этой части Кемеровской области характеризуются как вполне благоприятные для формирования и функционирования биогеоценозов [5]. Достаточное количество влаги способствует нормальному произрастанию как древесных, так и травянистых растений, продуцированию органического вещества, определяя интенсивность и емкость биогеохимического круговорота при рекультивационных работах.

1. Материалы и методы исследования

1.1. Выбор и характеристика моделируемых показателей

Факторы зарастания отвалов на территории Кузбасса достаточно детально проанализированы в работах промышленных ботаников, занимавшихся проблемой рекультивации нарушенных земель региона. Установлено, что скорости зарастания отвалов зависят главным образом: от *литологического состава, возраста отвала и рельефа поверхности*. В зависимости от сочетания этих факторов А.Н. Курприяновым с соавторами [4] выделено восемь групп экотопов, различающихся по водно-тепловому балансу и, соответственно, скорости и направленности

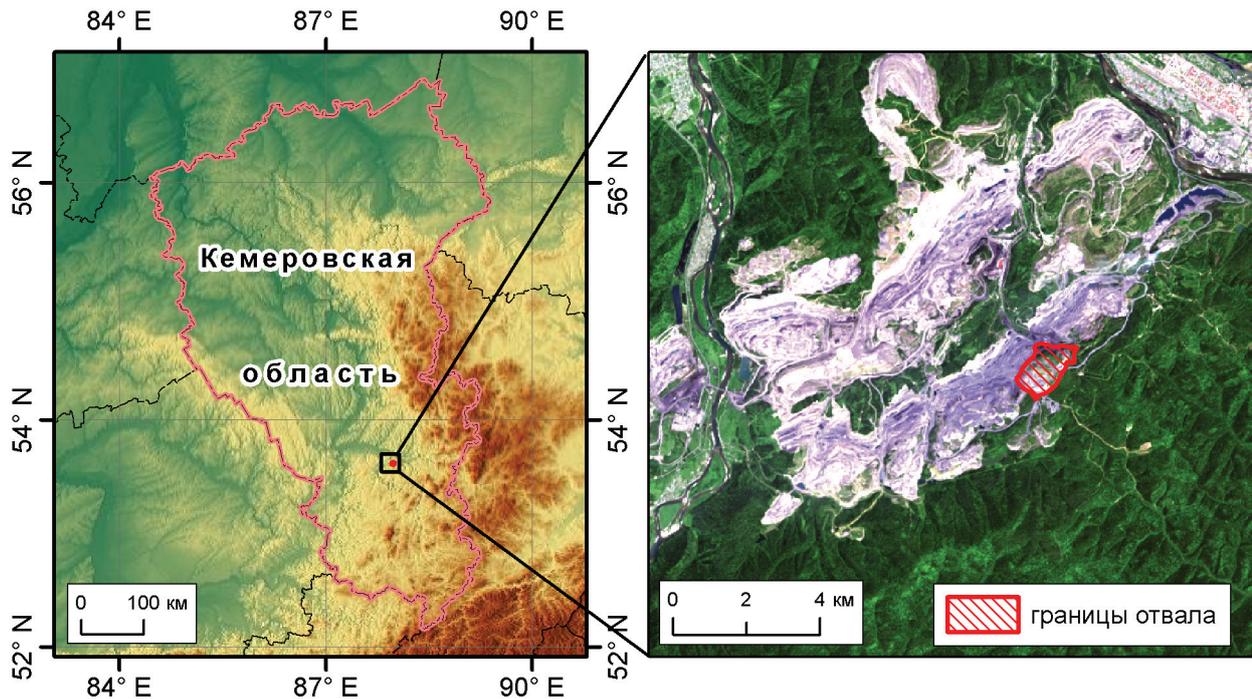


Рис. 1. Расположение района исследования

Fig. 1. Location of the study area

протекания сукцессии. Первой задачей исследования стал выбор таких показателей для моделирования, которые, изменяясь в пределах отдельно взятого отвала, влияют на скорости зарастания.

На угольных месторождениях рассматриваемой территории породы, слагающие угленосные толщи, а следовательно, и отвалы после добычи полезного ископаемого представлены преимущественно переслаивающимися слаболитифицированными алевритами и песчаниками, т.е. литологический состав является относительно однородным, и при моделировании его можно не учитывать.

Другая характеристика, определяющая скорости зарастания, – это возраст отвала, который для исследуемого объекта превышает 30 лет. При моделировании этот показатель также является фоновым, и его можно не учитывать. Но он важен при анализе результатов, так как за три десятилетия поверхность отвала заросла (после лесной рекультивации, а также, частично, в результате самозарастания [8]), что дает возможность оперативно проверить результаты моделирования.

Что касается рельефа, то его роль в восстановлении растительного покрова является ключевой за счет перераспределения на поверхности отвала тепла, влаги и мелкозема. Различные аспекты связи рельефа и растительности изучены достаточно подробно [14, 20, 21, 27 и др.]. Имеются работы, специально посвященные анализу влияния рельефа на зарастание угольных отвалов, как зарубежных [17, 19, 23, 26, 28], так и российских исследователей

[2, 4, 7]. Учитывая то, что большая часть поверхности породных отвалов представляет собой склоны, для моделирования можно использовать такие показатели, определяемые рельефом, как *экспозиция, угол наклона и форма склонов*, из которых последние два во многом определяют еще один показатель – *позицию в пределах почвенной катены*. Кратко остановимся на их характеристике.

Экспозиция склонов контролирует прежде всего количество солнечной радиации. Наиболее высокой инсоляцией отличаются склоны южной (Ю), юго-западной (ЮЗ), западной (З); умеренной – восточной (В), юго-восточной (ЮВ); более низкой – северной (С), северо-восточной (СВ) и северо-западной (СЗ) экспозиций. Отмечено также, что на откосах южных, юго-западных и западных экспозиций, а также на вершинах, как правило, зимой отсутствует защитный снежный покров, а летом отмечаются высокие температуры поверхности, что определяет пониженную влагообеспеченность грунтов. Откосы северных и восточных румбов по этим микроклиматическим показателям имеют более благоприятные характеристики для развития сукцессионных процессов [4].

Угол наклона и форма склонов техногенных форм рельефа также оказывают влияние на скорость и направление сукцессионного процесса. Влияние угла наклона на экологические условия техногенных ландшафтов проявляется в том, что с ростом крутизны склонов более 15° (граничное значение угла – 15° определено эмпирически [8]) увеличивается

сухость и снижается трофность субстратов, т.е. ухудшаются условия для зарастания. По форме склоны можно разделить на выпуклые, прямые и вогнутые. На выпуклых и прямых преобладают процессы денудации (транзита), затрудняющие закрепление растительности, а на вогнутых – процессы аккумуляции, способствующие зарастанию [11]. При моделировании на склонах относительно небольшой длины «выпуклые» и «прямые» склоны можно рассматривать в одной группе «выпуклых».

Кроме того, отвалы представляют собой развивающиеся динамичные системы – почвенные катены, где выделяются элювиальная, транзитная и аккумулятивная позиции [5, 10]. Элювиальная позиция образуется на вершинах и привершинных частях склонов и характеризуется выпуклой формой и углом наклона менее 15° (неблагоприятная для зарастания), транзитная – прямой формой и углом более 15° (умеренно благоприятная); аккумулятивная, формирующаяся у подножия, имеет вогнутую форму и угол более 15° (благоприятная).

Таким образом, основу моделирования составило положение о том, что дифференциация поверхности отвалов по степени благоприятности зарастания определяется сочетанием следующих показателей: экспозиция, угол наклона и форма (вогнутая и выпуклая) склонов, а также позиция участков в пределах почвенной катены.

1.2. Методы исследования

В качестве ведущего метода исследования параметров экологических условий зарастания отвала использовано *ГИС-моделирование на основе цифровой модели рельефа (ЦМР)*. Чтобы подтвердить достоверность результатов, было выполнено их сопоставление с *данными дистанционного зондирования и полевых наблюдений, включающих геоботанические описания*.

ГИС-моделирование и анализ рельефа поверхности отвала и прилегающей территории выполнены с помощью ArcGIS (модули Spatial Analyst Tools and Analysis Tools) в соответствии с разработанным алгоритмом (рис. 2).

При моделировании использовался метод интерполяции Михаэля Хатчинсона [18], специально разработанный для создания ЦМР. Данный метод реализован в ArcGIS в виде алгоритма ANUDEM. С использованием инструмента «Topo to Raster» (модуль Spatial Analyst Tools) для поверхности отвала и прилегающей территории построена растровая ЦМР с разрешением на местности 7 м (рис. 3а).

Основой для создания цифровой модели рельефа послужили материалы топографической съемки поверхности отвала и прилегающей территории,

предоставленные специалистами Красногорского угольного разреза угольной компании «Южный Кузбасс». Перед созданием ЦМР данные топосъемки конвертированы из векторного формата САПР (AutoCAD) в shape-формат. Для оценки степени благоприятности местообитаний созданы производные от ЦМР растровые модели: экспозиции склонов по сторонам света, формы, а также углов наклонов поверхности.

Экспозиция и углы наклона рассчитаны с использованием алгоритмов, представленных в [15]. Форма (выпуклая – вогнутая) вычислена на основе алгоритма Zevenbergen–Thorne [22, 29].

Растр экспозиции склонов переклассифицирован в новый растр (рис. 3б), отражающий степень благоприятности экспозиции для зарастания отвалов, который для дальнейшего анализа конвертирован в полигональные векторные объекты.

Растр формы поверхности (кривизны по [29]) в соответствии с решаемой задачей был переклассифицирован на два класса, соответствующих выпуклым (для *элювиальной* зоны катены) и вогнутым (для *аккумулятивной* зоны) поверхностям (рис. 3в), а затем также конвертирован в полигональные векторные объекты.

Из растра углов наклона поверхности переклассификацией создан растр склонов с наклоном более 15° (рис. 3г). В результате конвертации переклассифицированного растра углов наклонов в полигональные векторные объекты были получены границы склоновых участков, которые соответствуют *транзитной* зоне катены.

Векторные границы различных зон катены, полученные на основе растров формы и углов наклонов поверхности, объединены в одном слое с помощью *оверлейных операций* (рис. 3д).

Последний шаг реализации алгоритма заключается в наложении методом пересечения векторных слоев зон катены и экспозиции склонов.

Результаты ГИС-моделирования соотнесены с *данными полевых наблюдений* зарастания форм микрорельефа и *геоботаническими описаниями*. С этой целью на участках, отличающихся по степени благоприятности, в 2015 году на отвале Красногорского разреза были заложены геоботанические площадки. На стандартной площади описания (400 м²) по методике [12] оценено видовое разнообразие, а также в соответствии с рекомендациями, разработанными для угольных отвалов Кемеровской области [3], выделены стадии первичных сукцессий: пионерная группировка (далее по тексту, соответственно, I стадия), простой (II), сложный (III) и зональный фитоценоз (IV) (или полное восстановление).

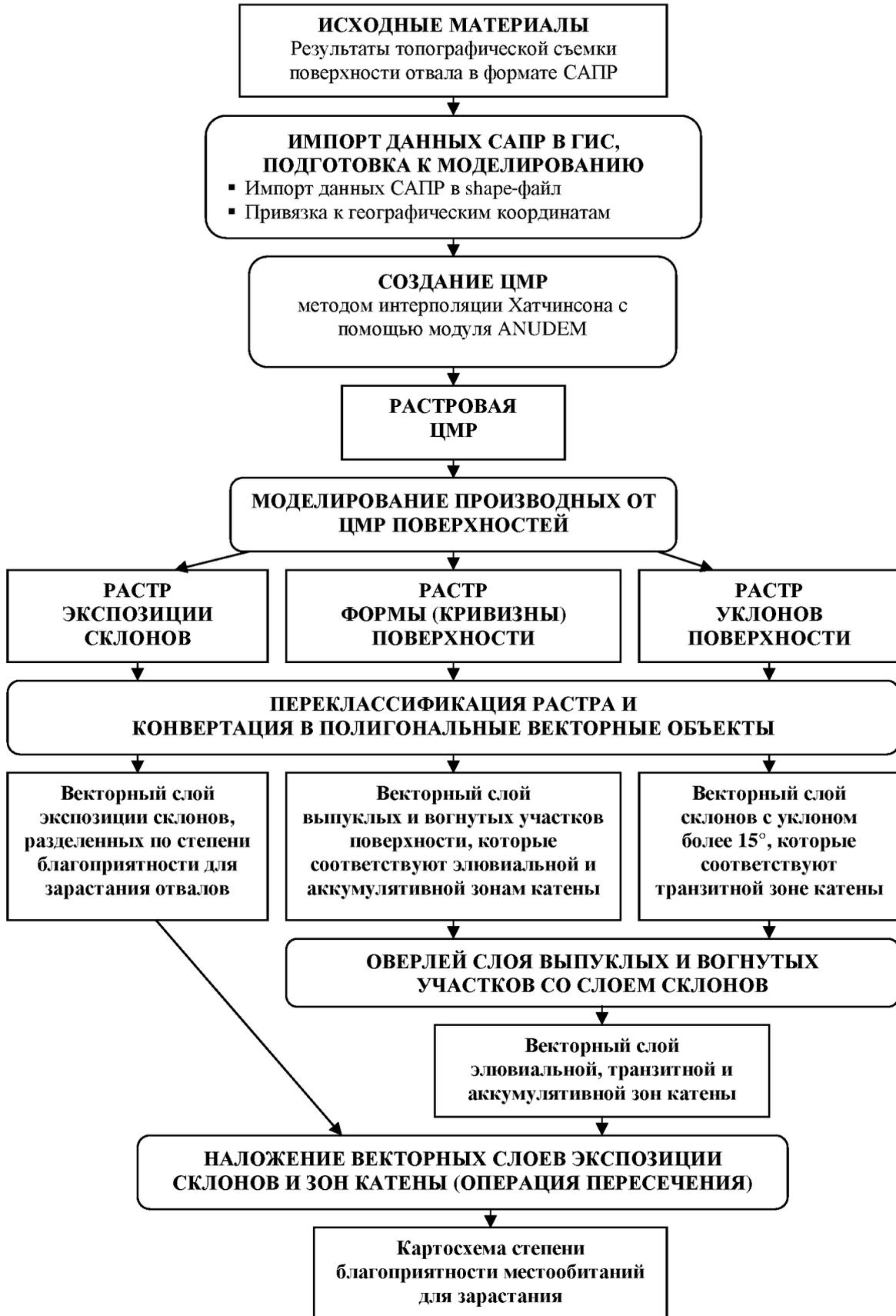


Рис. 2. Алгоритм геоинформационного моделирования для оценки степени благоприятности зарастания отвалов

Fig. 2. Algorithm of geoinformation modeling to assess the suitability of coal dumps surface for revegetation

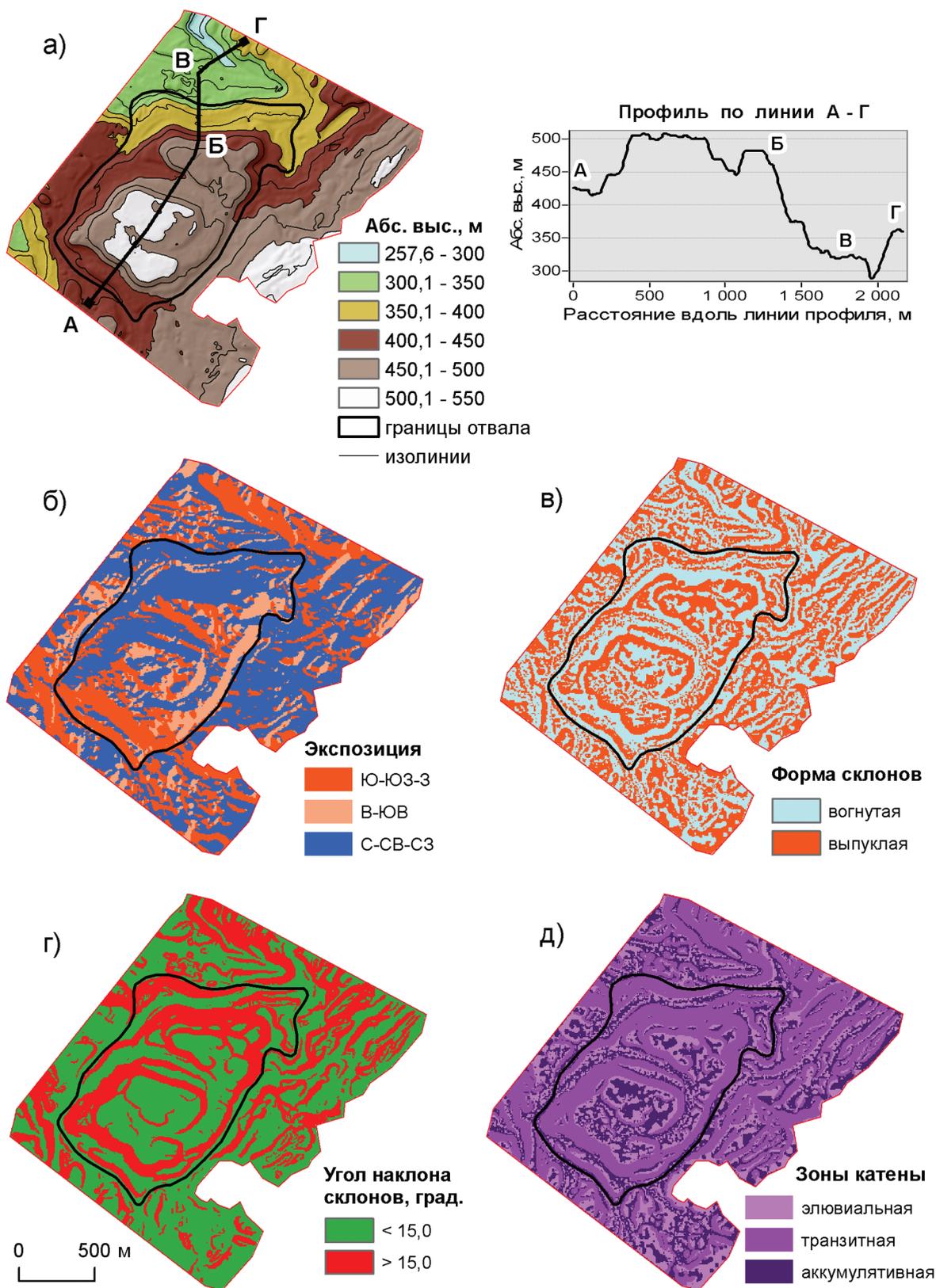


Рис. 3. Промежуточные результаты моделирования
 а) гипсометрическая схема отвала на основе ЦМР; результат переклассификации растров:
 б) экспозиции, в) формы склонов, г) углов наклона; д) векторный слой границ зон катены

Fig. 3. Intermediate modeling outcomes
 a) hypsometry of coal dump based on DEM; the result of raster reclassification:
 b) aspect, c) shape of slopes (surface curvature), d) slope; e) vector layer of soil catena zones boundaries

Сравнение данных ГИС-моделирования и дистанционного зондирования.

Для выделенных по степени благоприятности местообитаний был проведен анализ распределения значений нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [24, 25]. Для расчета NDVI использовано безоблачное изображение Landsat ETM+ 05 июня 2015 года, полученное при помощи веб-сервиса спутниковых изображений Геологической службы США (EarthExplorer, 2016). Атмосферная коррекция изображения проведена по методу Dark Object Subtraction [16]. NDVI был рассчитан по формуле [24, 25]:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где для Landsat ETM+ RED – спектральная полоса с длиной волны 0,63-0,69 мкм (band 3); NIR (Near Infrared) – 0,77-0,90 мкм (band 4).

Распределение значений NDVI для различных по условиям зарастания местообитаний выявлено с помощью инструментов зональной статистики.

2. Результаты и их обсуждение

В результате ГИС-моделирования и анализа рельефа поверхности отвала в соответствии с разработанным алгоритмом получена картосхема степени благоприятности местообитаний для зарастания (рис. 4), отражающая их пространственную структуру. В пределах изучаемого отвала выделены благоприятные, умеренно благоприятные и неблагоприятные участки.

Характеристика выделенных при ГИС-моделировании местообитаний на основе данных полевых наблюдений зарастания форм микрорельефа и геоботанического обследования.

Участки благоприятных местообитаний охватывают 66,1 га, что составляет около половины (47,1%) площади отвала. К ним отнесены аккумулятивные зоны выровненных поверхностей и пологих склонов световых (В и ЮВ), а также аккумулятивные и транзитные зоны теневых (С, СВ, СЗ) экспозиций.

Наиболее благоприятные местообитания в условиях песчаных отвалов представлены плоскими днищами западин и межгребневых ложин. Здесь идет накопление мелкозема, происходит инициация почвообразовательного процесса (формирование эмбриоземов) и заносится самое большое количество семян. Растительные сообщества находятся на II и III стадиях первичных сукцессий. По данным выполненных геоботанических описаний, видовое богатство составляет 32-39 видов; проективное покрытие древесного яруса от 40 до 70, травянистого – 20-90%.

Благоприятные условия местообитаний характерны также и для пологих склонов песчаных отвалов. Это обусловлено прежде всего большим количеством частиц субстрата мелких фракций и его влажностью. Мелкозем накапливается по глубоким ложинам, промоинам, а также в аккумулятивной части отвалов. Растительные сообщества II-III стадий сукцессии; видовое богатство 17-33 видов; проективное покрытие древесного яруса 20-50, травянистого – 40-80%.

Участки умеренно благоприятных местообитаний распространены на 40,3 га и охватывают 28,7% площади отвала. Эти участки отнесены к элювиальной зоне С, СВ, СЗ; транзитной зоне В, ЮВ; аккумулятивной зоне Ю, ЮЗ, З склонов.

Местообитания элювиальной зоны на выровненных поверхностях песчаных отвалов характеризуются повышенным количеством продуктов разрушения песчаных и благоприятным водным режимом. Растительные сообщества представлены в основном II стадией сукцессии. Видовое богатство составляет 20-26 видов; проективное покрытие древесного яруса равно 30-40, травянистого – 50-70%.

Умеренно благоприятные местообитания пологих теневых склонов песчаных отвалов обусловлены меньшей инсоляцией, накоплением мелкозема в микрозападинах и, как следствие, более хорошими условиями увлажнения. Растительные сообщества соответствуют I и II стадиям сукцессии; видовое богатство представлено 17-20 видами; проективное покрытие древесного яруса – 5-40, травянистого – 35-60%.

Участки неблагоприятных местообитаний занимают 34,0 га площади отвала (24,2%) и охватывают элювиальную и транзитную зоны Ю, ЮЗ, З склонов, а также элювиальную зону В, ЮВ склонов.

Неблагоприятные условия произрастания на плоских вершинах отвалов складываются в результате неполного разложения глыб песчаных и алевролитов, а зачастую связаны еще и с чрезмерным уплотнением поверхности отвала. На дефицит влаги оказывает влияние и то, что во многих местах отвала в зимнее время снежный покров отсутствует. Растительные сообщества относятся к I и II стадиям сукцессии. Видовое богатство – 9-20 видов; проективное покрытие древесного яруса 0-40, травянистого – 1-40%.

Крутые склоны световых экспозиций отличаются повышенной инсоляцией. Особенностью этих местообитаний является постоянно обновляющийся чехол техногенного элювия (в результате микрооползней, струйчатой эрозии, происходящей сортировки крупнокаменистых фракций). Зарастание идет медленно, растительные сообщества длительно

находятся на I и II стадиях сукцессии; видовое богатство – 16-26 видов; проективное покрытие древесного яруса 0-40, травянистого – 15-60%.

Сравнение данных ГИС-моделирования и дистанционного зондирования.

Чтобы подтвердить достоверность результатов ГИС-моделирования, выполнено их сопоставление с данными дистанционного зондирования по распределению индекса NDVI, который является показателем количества фотосинтетически активной

биомассы. Это один из самых распространенных и широко используемых индексов для решения задач количественной оценки растительного покрова.

Распределение индекса NDVI на поверхности отвала показано на рисунке 5а. Для двух наиболее контрастных по условиям зарастания типов местообитаний (благоприятных и неблагоприятных) с помощью инструментов зональной статистики построены гистограммы распределения положительных значений NDVI (рис. 5б, 5в).

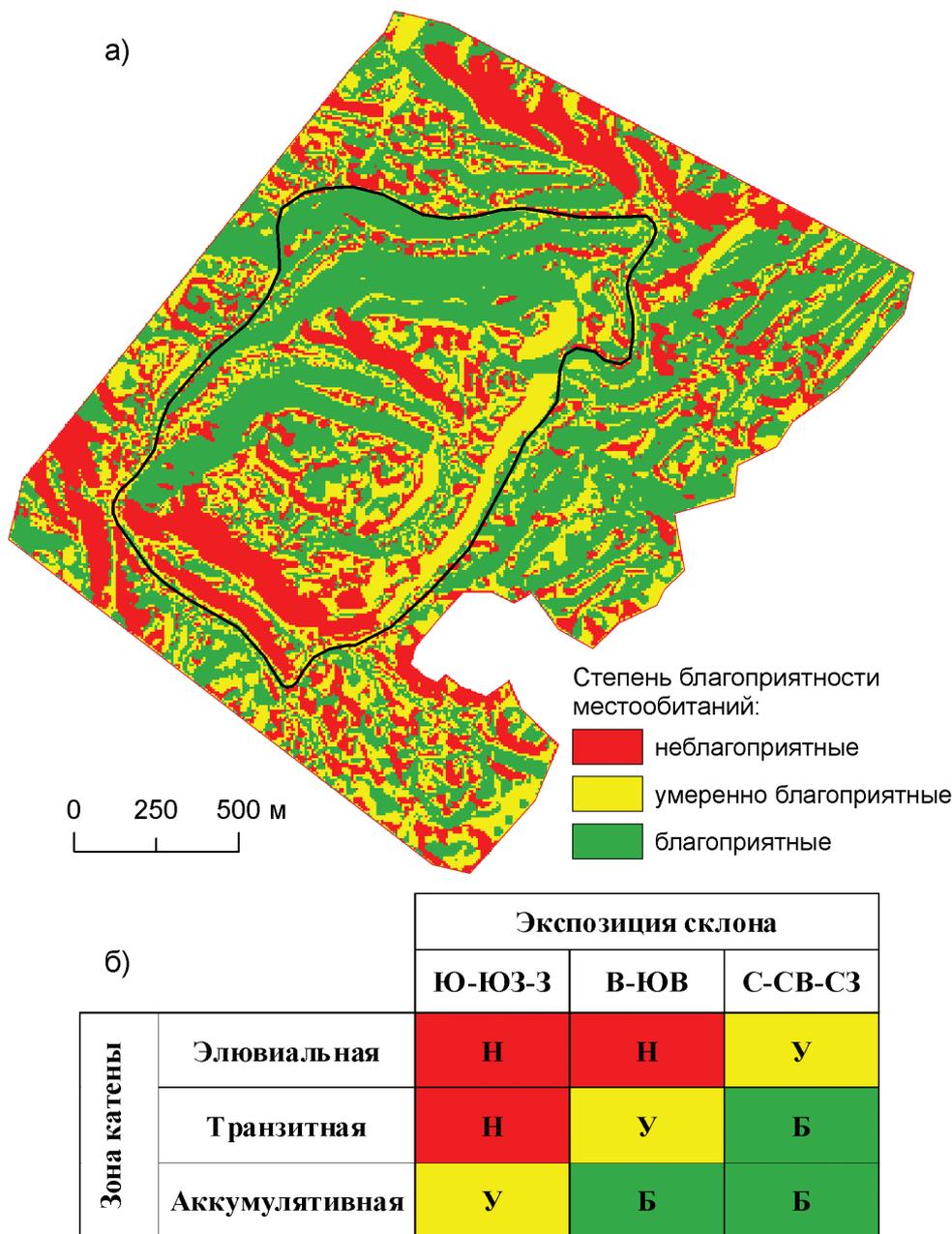


Рис. 4. Степень благоприятности местообитаний на отвале и прилегающей территории Красногорского разреза (а) в зависимости от экспозиции и положения в пределах катены (б) в пределах неблагоприятных (Н), умеренно благоприятных (У) и благоприятных (Б) местообитаний

Fig. 4. Suitability of habitats on coal dump and adjacent area of the Krasnogorsk opencast coal mine (a) depending on aspect and location within soil catena (b). Suitability of habitats: U – unfavorable, M – moderate favorable, F – favorable

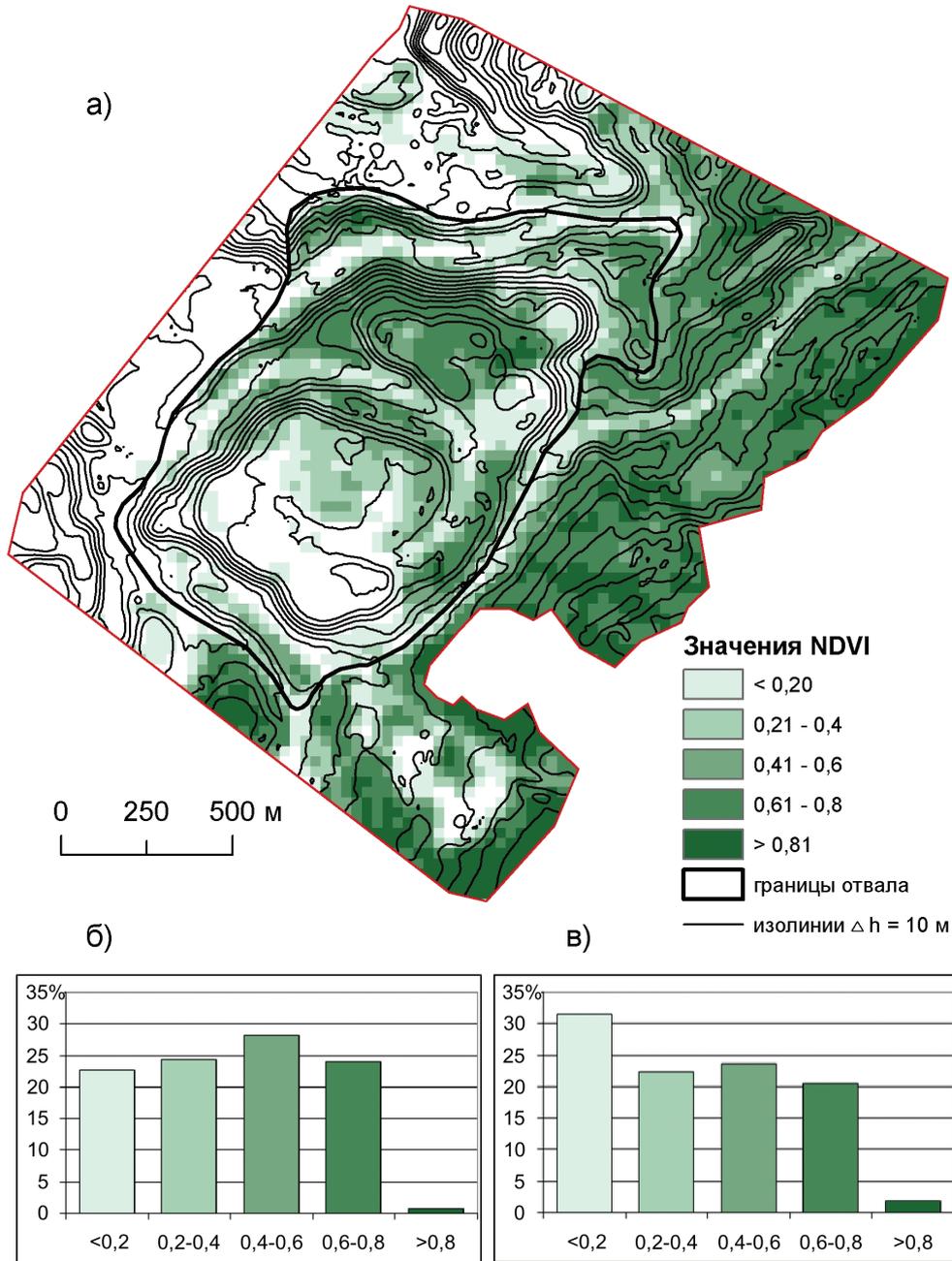


Рис. 5. Распределение значений NDVI на поверхности отвала и прилегающей территории по состоянию на 05.06.2015 г. (а) с гистограммами для благоприятных (б) и неблагоприятных (в) местообитаний

Fig. 5. Distribution of NDVI values on the coal dump and the adjacent area as of June 5 2015 (a) with histograms for favorable (b) and unfavorable (c) habitats

Анализ распределений позволяет увидеть, что для благоприятных местообитаний характерна большая доля высоких значений индекса (доля участков со значением NDVI < 0,4 составляет 47%; NDVI > 0,4 – 53%), в то время как для неблагоприятных местообитаний характерна тенденция к снижению доли более высоких значений индекса (доля участков со значением NDVI < 0,4 – 54%; > 0,4 – 46%).

Другие статистические характеристики, представленные в таблице 1, также указывают на относи-

тельно лучшее развитие растительности в пределах благоприятных местообитаний. Различия между местообитаниями максимально проявляются в проективном покрытии растительности (характеризуемом количеством пикселей), которое на благоприятных в 2,5 раза выше, чем на неблагоприятных.

Таким образом, можно видеть, что распределение значений NDVI достаточно хорошо согласовано с выделенными типами местообитаний. Присутствующие на гистограммах асимметрия

Таблица

Статистические характеристики положительных значений NDVI для местообитаний отвала

Statistical characteristics of positive NDVI values for dump habitats

Тип местообитания	Количество пикселей	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение
Благоприятные	605	0,02	0,85	0,40	0,22
Неблагоприятные	228	0,01	0,82	0,37	0,23

и полимодальность указывают, что на распределение значений вегетационного индекса в границах местообитаний очевидно влияют и другие не учтенные при моделировании факторы, среди которых решающее значение, вероятно, принадлежит гранулометрическому составу субстрата или времени отсыпки поверхности отвала. Случаи, когда на неблагоприятных по условиям зарастания местообитаниях наблюдаются высокие значения NDVI, могут быть предметом отдельного исследования.

Заключение

Разработанный алгоритм геоинформационного моделирования для оценки степени благоприятности зарастания песчаниковых отвалов реализован для отвала Красногорского разреза (расположенного в таежной зоне Кузнецкого Алатау) на юге Кемеровской области. В качестве моделируемых показателей степени благоприятности использованы определяемые рельефом сочетания условий зон почвенной катены (элювиальной, транзитной и аккумулятивной), инсоляции (связанной с экспозицией склона), угла наклона и формы склонов. С помощью ГИС-моделирования создана картосхема степени благоприятности местообитаний на участке отвала и прилегающей территории, рассчитана площадь каждого участка и выявлена пространственная структура местообитаний. Установлено, что доля благоприятных местообитаний составляет 47,1% площади отвала, умеренно благоприятных – 28,7%, неблагоприятных – 24,2%. Для всех категорий местообитаний выборочно оценено видовое разнообразие и стадии сукцессии, которые в целом отражают характеристику участков.

Сравнение расчетных данных с результатами полевых наблюдений зарастания форм микрорельефа, геоботанических исследований и с данными NDVI-анализа показало возможность использования геоинформационного моделирования для

выделения и расчетов площади благоприятных и неблагоприятных местообитаний с целью оптимизации биологической рекультивации участков угольных отвалов.

Работа выполнена в рамках программы развития ООН (ПРООН)/ ГЭФ Минприроды России «Задачи сохранения биоразнообразия в политике и программах развития энергетического сектора России» (2012-2017 гг.).

Ключевые слова: угольные отвалы, благоприятные местообитания, рельеф, экспозиция склона, почвенная катена, геоинформационное моделирование, цифровая модель рельефа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агроклиматические ресурсы Кемеровской области / под ред. М.И. Черникова. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – 141 с.
2. Баранник Л.П. Экологическое обоснование и опыт биологической лесной рекультивации на техногенных территориях в Кузбассе // Методика изучения техногенных биогеоценозов. – М. : Наука, 1978. – С. 159-165.
3. Кандрашин Е.Р. Характерные черты формирования естественной растительности на отвалах угольных разрезов Кузбасса. – Новосибирск : Наука, 1976. – С. 287-290.
4. Куприянов А.Н., Манаков Ю.А., Баранник Л.П. Восстановление экосистем на отвалах горнодобывающей промышленности Кузбасса. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2010. – 160 с.
5. Манаков Ю.А., Стрельникова Т.О., Куприянов А.Н. Формирование растительного покрова в техногенных ландшафтах Кузбасса. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011. – 168 с.
6. Норин Б.Н., Кистинг Л.И. Стадии формирования растительных сообществ в горных тундрах Плато Путорана // Ботанический журнал. – 1982. – № 1. – С. 15-24.

7. Рагим-заде Ф.К., Трофимов С.С., Щербатенко В.И., Баранник Л.П. Гипергенез и эволюция техногенного рельефа Кузбасса // Восстановление техногенных ландшафтов Сибири. – Новосибирск : Наука, 1977. – С. 14-26.
8. Стрельникова Т.О., Куприянов А.Н., Манаков Ю.А., Куприянов О.А. Влияние угледобычи на разнообразие и экологическую структуру растительного покрова низкогорий Кузнецкого Алатау // Ботанические исследования Сибири и Казахстана. – Кемерово : КРЭОО «Ирбис», 2016. – Вып. 22. – С. 90-99.
9. Счастливец Е.Л. Формирование геоэкологической ситуации в угледобывающем комплексе Кузбасса // Рекультивация нарушенных земель в Сибири. – Кемерово : ИНТ, 2005. – Вып. 1. – С. 15-35.
10. Сукцессии и биологический круговорот / отв. ред. В.М. Курачев ; Рос. АН, Сиб. отд-ние, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Новосибирск : Наука, 1993. – 154 с.
11. Танасиенко А.А., Путилин А.Ф., Артамонова В.С. Экологические аспекты эрозионных процессов : анализ обзор / ГПНТБ СО РАН ; Ин-т почвоведения и агрохимии СО РАН ; науч. ред. И.М. Гаджиев. – Новосибирск, 1999. – 89 с. – (Серия «Экология» ; вып. 55).
12. Шенников А.П. Введение в геоботанику. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1964. – 447 с.
13. Шпайхер Е.Д., Салихов В.А. Месторождения полезных ископаемых и их разведка : учеб. пособие. – 2-е изд. – Новокузнецк : СибГИУ, 2003. – 239 с. – URL: <http://window.edu.ru/library/pdf2txt/121/71121/48337> (дата обращения: 10.08.2017).
14. Bolstad P.V., Swank W., Vose J. Predicting Southern Appalachian overstory vegetation with digital terrain data // *Landscape Ecology*. – 1998. – V. 13, Is. 5. – P. 271-283.
15. Burrough P.A., McDonnel R.A. Principles of Geographical Information Systems. – New York : Oxford University Press, 1998. – 333 p.
16. Chavez P.S. Image-based atmospheric corrections – revisited and improved // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1996. – V. 62, No. 9. – P. 1025-1036.
17. Deng Y., Chen X., Chuvieco E., Warner T., Wilson J.P. Multi-scale linkages between topographic attributes and vegetation indices in a mountainous landscape // *Remote Sensing of Environment*. – 2007. – V. 111, Is. 1. – P. 122-134. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.03.016> (date of access: 10.08.2017).
18. Hutchinson M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // *Journal of Hydrology*. – 1989. – V. 106, No. 3. – P. 211-232.
19. Alday J.G., Marrs R.H., Martínez-Ruiz C. The importance of topography and climate on short-term revegetation of coal wastes in Spain // *Ecological Engineering*. – 2010. – V. 36, Is. 4. – P. 579-585. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.005> (date of access 08.09.2017).
20. McNab W.H. Terrain shape index: Quantifying effect of minor landforms on tree height // *Forest Science*. – 1989. – V. 35, Is. 1. – P. 91-104.
21. Meentemeyer R.K., Moody A., Franklin J. Landscape-scale patterns of shrub-species abundance in California chaparral: The role of topographically mediated resource gradients // *Plant Ecology*. – 2001. – V. 156, Is. 1. – P. 19-41.
22. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Digital Terrain Modelling // Hydrological Processes*. – 1991. – V. 5, Is. 1. – P. 3-30.
23. Pan J., Bai Z., Cao Y., Zou W., Wang J. Influence of soil physical properties and vegetation coverage at different slope aspects in a reclaimed dump // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – V. 24, Is. 30. – P. 23953-23965. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9974-5> (date of access: 08.09.2017).
24. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *Third ERTS Symposium, NASA SP-351*. – 1973. – V. 1. – P. 309-317.
25. Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environments*. – 1979. – V. 8, Is. 2. – P. 127-150.
26. Wang J., Hongdan W., Cao Y., Bai Z., Qin Q. Effects of soil and topographic factors on vegetation restoration in opencast coal mine dumps located in a loess area // *Scientific Reports*. – 2016. – 6:22058. – DOI: 10.1038/srep22058. – URL: <https://www.nature.com/articles/srep22058> (date of access: 06.09.2017).
27. White A.B., Kumar P., Tcheng D. A data mining approach for understanding topographic control on climate-induced inter-annual vegetation variability over the United States // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – V. 98, Is. 1. – P. 1-20.
28. Liu X., Zhou W., Bai Z. Vegetation coverage change and stability in large open-pit coal mine dumps in China during 1990-2015 // *Ecological Engineering*. – 2016. – V. 95. – P. 447-451. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.051> (date of access: 04.09.2017).
29. Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 1987. – V. 12, Is. 1. – P. 47-56.

REFERENCES

1. Agroclimatic resources of Kemerovo oblast / Ed. M.I. Chernikov. Leningrad : Gidrometeoizdat Publ. 1973. 141 p.

2. Barannik L.P. Ecological substantiation and experience in biological forest reclamation on industrial territories of Kuzbass // *Methods of studying technogenic biogeocenoses*. Moscow : Nauka Publ., 1978. P. 159-165.
3. Kandrashin E.R. Characteristic features of natural vegetation formation on dumps of opencast coal mines in Kuzbass. Novosibirsk : Nauka Publ. 1976. P. 287-290.
4. Kupriyanov A.N., Manakov Yu.A., Barannik L.P. Ecosystem restoration on mining dumps of Kuzbass. Novosibirsk : Academic Publishing House «Geo», 2010. 160 p.
5. Manakov Yu.A., Strelnikova T.O., Kupriyanov A.N. Formation of vegetation in technogenic landscapes of Kuzbass. Novosibirsk : SB RAS Publishing House, 2011. 168 p.
6. Norin B.N., Kisting L.I. Stages of formation of plant communities in mountain tundra of the Putorana Plateau // *Botanichesky zhurnal*. 1982. No. 1. P. 15-24.
7. Ragim-zade F.K., Trofimov S.S., Scherbatenko V.I., Barannik L.P. Hypergenesis and evolution of technogenic relief in Kuzbass // *Restoration of technogenic landscapes of Siberia*. Novosibirsk : Nauka Publ., 1977. P. 14-26.
8. Strelnikova T.O., Kupriyanov A.N., Manakov Yu.A., Kupriyanov O.A. Impact of coal mining on diversity and ecological structure of vegetation of low-mountain relief in the Kuznetsk Alatau // *Botanical studies of Siberia and Kazakhstan*. Kemerovo : Kemerovo regional ecological public organization «Irbis», 2016. Is. 22. P. 90-99.
9. Schastlivtsev Ye.L. Formation of geoeological situation in coal mining complex of Kuzbass // *Reclamation of disturbed lands in Siberia*. Kemerovo : INT Publ., 2005. Is. 1. P. 15-35.
10. Succession and biological cycle / Ed. V.M. Kurachev ; SB RAS, Institute of Soil Science and Agrochemistry. Novosibirsk : Nauka Publ., 1993. 154 p.
11. Tanasienko A.A., Putilin A.F., Artamonova V.S. Environmental aspects of erosion processes : Analytical review / SPSTL SB RAS ; Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS / Ed. I.M. Hadzhiyev. Novosibirsk, 1999. 89 p.
12. Shennikov A.P. Introduction to geobotany. Leningrad : Publishing House of Leningrad State University, 1964. 447 p.
13. Shpaykher E.D., Salikhov V.A. Mineral deposits and their exploration : textbook. 2nd ed., Revised and enlarged. Novokuznetsk : SibGIU Publ., 2003. 239 p. URL: <http://window.edu.ru/library/pdf2txt/121/71121/48337>.
14. Bolstad P.V., Swank W., Vose J. Predicting Southern Appalachian overstory vegetation with digital terrain data // *Landscape Ecology*. 1998. V. 13, Is. 5. P. 271-283.
15. Burrough P.A., McDonnel R.A. Principles of Geographical Information Systems. New York : Oxford University Press, 1998. 333 p.
16. Chavez Pat S. Image-based atmospheric corrections – revisited and improved // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1996. № 62 (9). P. 1025-1036.
17. Deng Y., Chen X., Chuvieco E., Warner T., Wilson J.P. Multi-scale linkages between topographic attributes and vegetation indices in a mountainous landscape // *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 111, Is. 1. P. 122-134. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.03.016> (date of access: 10.08.2017).
18. Hutchinson M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits // *Journal of Hydrology*. 1989. V. 106. № 3. P. 211-232.
19. Alday J.G., Marrs R.H., Martínez-Ruiz C. The importance of topography and climate on short-term revegetation of coal wastes in Spain // *Ecological Engineering*. 2010. V. 36, Is. 4. P. 579-585. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.005> (date of access: 08.09.2017).
20. McNab W.H. Terrain shape index: Quantifying effect of minor landforms on tree height // *Forest Science*. 1989. V. 35, Is. 1. P. 91-104.
21. Meentemeyer R.K., Moody A., Franklin J. Landscape-scale patterns of shrub-species abundance in California chaparral: The role of topographically mediated resource gradients // *Plant Ecology*. 2001. V. 156, Is. 1. P. 19-41.
22. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Digital Terrain Modelling // Hydrological Processes*. 1991. V. 5, Is. 1. P. 3-30.
23. Pan J., Bai Z., Cao Y., Zou W., Wang J. Influence of soil physical properties and vegetation coverage at different slope aspects in a reclaimed dump // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. V. 24, Is. 30. P. 23953-23965. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9974-5> (date of access: 08.09.2017).
24. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *Third ERTS Symposium, NASA SP-351*. 1973. V. 1. P. 309-317.
25. Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environments*. 1979. V. 8, Is. 2. P. 127-150.
26. Wang J., Hongdan W., Cao Y., Bai Z., Qin Q. Effects of soil and topographic factors on vegetation restoration in opencast coal mine dumps located in a loess area // *Scientific Reports*. 2016. 6:22058. DOI: 10.1038/srep22058 URL: <https://www.nature.com/articles/srep22058> (date of access: 06.09.2017).
27. White A.B., Kumar P., Tcheng D. A data mining approach for understanding topographic control on climate-induced inter-annual vegetation variability over the United States // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 98. P. 1-20.
28. Liu X., Zhou W., Bai Z. Vegetation coverage change and stability in large open-pit coal mine dumps in China during 1990-2015 // *Ecological Engineering*. 2016. V. 95. P. 447-451. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.051> (date of access: 04.09.2017).
29. Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography // *Earth Surface Processes and Landforms*. 1987. V. 12, Is. 1. P. 47-56.