

Прогнозное картографирование пространственно-временной динамики экосистем при разнонаправленных трендах климатического увлажнения в субаридных условиях

Д. А. ЧУПИНА¹, И. Д. ЗОЛЬНИКОВ¹, Е. Н. СМОЛЕНЦЕВА²

¹Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3
E-mail: churina_da@igm.nsc.ru, zol@igm.nsc.ru

²Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 8/2
E-mail: parabraunerde@rambler.ru

Статья поступила 25.02.2020

После доработки 02.04.2020

Принята к печати 06.04.2020

АННОТАЦИЯ

Предложен подход к моделированию пространственно-временной динамики лесостепных экосистем при изменении климата на основе использования морфометрического анализа цифровой модели рельефа SRTM. Прогноз основан на анализе геолого-геоморфологического каркаса с учетом функционального значения конкретных форм и типов рельефа и их влияния на статические и динамические свойства экосистем. Наиболее устойчивыми к изменениям климата являются территории с равнинным рельефом, в то время как территории с озерным рельефом наиболее уязвимы как при гумидизации, так и при аридизации. Прогнозное картографирование на основе ГИС и ДЗ подтверждает гипотезу об очагово-дискретном характере пространственных изменений в лесостепной зоне Западной Сибири при различных климатических трендах.

Ключевые слова: прогнозное картографирование, пространственно-временная динамика, изменение климата, цифровые модели рельефа, SRTM.

Изучение различных аспектов динамики экосистем относится к приоритетным научным направлениям в XXI в. Изменение климата за последнее столетие оказывает значительное воздействие на глобальные экосистемы и биоразнообразие [Второй оценочный доклад..., 2014]. Большое значение имеют методы, позволяющие оценить пространственное распределение и масштаб этих изменений для различного уровня организации природно-территориальных комплексов (ПТК). В настоящее

время для исследования пространственных характеристик состояния и динамики экосистем все большее значение приобретают методы ГИС и ДЗ, особенно актуальные для крупных территорий, или относительно динамичных компонентов ПТК, таких как водные объекты, некоторые растительные сообщества, нарушенные территории и т. д. В рамках этого направления важную роль играет прогнозное картографирование, результаты которого можно визуализировать в виде карт и схем.

Исследования в этом направлении активно ведутся во всем мире. Так, например, разработан метод автоматической фиксации границы леса (treeline) и изменения ее пространственного положения для горных условий США [Wei et al., 2020]. В Румынии изучались изменения лесных экосистем в аридных районах с помощью двух индексов: индекса Де Мартона и индекса засухливости ЮНЕП. Количественная оценка влияния процессов деградации лесных экосистем и вырубок леса проводилась на основе индексов NDVI и MSAVI2, рассчитанных по космическим снимкам Landsat 5TM. Результат показал, что усиление засухливых условий значительно снизило экологический потенциал лесных экосистем, вызвав их деградацию за последние два-три десятилетия [Pravalié et al., 2014]. При картографировании водно-болотных угодий и моделировании их пространственно-временной динамики в северной части Великих Равнин США использовался непараметрический статистический подход на основе данных спутниковых сенсоров высокого (RapidEye) и среднего (Landsat) разрешения [Gabrielsen et al., 2016].

Для сибирских территорий прогнозы изменения пространственных характеристик экосистем, обусловленные климатическими флуктуациями, немногочисленны. Пионерные исследования, связанные с основанными на ГИС и ДЗ методами краткосрочного и ретроспективного мониторинга динамики экосистем, в степном биоме Западной Сибири базировались на изучении изменчивости площадей озер (водные объекты) и солончаков (почвы) [Зольников и др., 2011]. Морфометрическое картографирование древних озерных котловин показало, что максимальная площадь озер в позднем голоцене превосходила современную в 11 раз. Палеоботаническими исследованиями фиксируются изменения соотношений между степным и лесным биомами в районе оз. Чаны в течение голоцена [Жилич и др., 2016]. Ретроспективным моделированием установлено, что максимум увлажнения укладывался в интервал 2–1,5 тыс. лет назад [Жилич и др., 2016; Nikulina, 2019]. В более позднее время началась аридизация, в ходе которой происходила фрагментация крупных водоемов, а затем постепенное их высыхание [Глушкова и др., 2016]. Другими исследовате-

лями установлено, что даже в недавнем времени в экотоне лесостепи Забайкалья в наиболее засушливые периоды (2006–2010 гг.) наблюдалось четырехкратное уменьшение количества озер (по сравнению с 1989 г.) и трехкратное – их площади (по сравнению с 2000 г.) [Им и др., 2015]. Временная динамика количества и площадь водной поверхности озер изучались по материалам спектрорадиометрической и гравиметрической съемок. Авторами установлена периодичность (около 29 лет) изменения уровня водной поверхности озер Забайкалья и прогнозируется минимум количества и уровня водной поверхности озер в 2033–2035 гг. При этом ожидаемые изменения могут превосходить ранее наблюдавшиеся в связи с усилением аридности.

По некоторым данным [Чебакова и др., 2003] при потеплении климата возможна полная перестройка растительных зон на равнинах: тундра, лесотундра и северная тайга заместятся южными типами растительности – южной тайгой и подтайгой, а также лесостепью и степью. Для Байкальского региона расчеты по биоклиматической модели растительности Сибири [Чебакова и др., 2003] показали, что к 2090 г. при потеплении по ариднему сценарию равновесная растительность будет характеризоваться сокращением ареала лесов в 2 раза, таким же ростом ареала опустыненных степей, сдвигом границы степей к северу на 10° и увеличением их площади на 30 % [Куликов и др., 2014].

Существует другой прогноз возможных изменений зональных границ растительности Европейской части и Западной Сибири в связи с глобальным потеплением климата на период 2046–2065 гг. [Румянцев и др., 2013]. Модель основана на результатах анализа ряда математических моделей общей циркуляции атмосферы и океана, разработанных в рамках проекта СМIP3. Результаты показали, что границы могут иметь положительный “сдвиг” (сдвигаться на север) или не сдвигаться вообще. Авторы отмечают главный недостаток полученной модели: она основана на связи зональности лишь с суммой активных температур и не учитывает чрезвычайно важные для растительности условия увлажнения. Это подтверждает установленную нами ранее закономерность, что в степном биоме ЗС динамика экосистем может быть реализована не сцена-

рием постепенных изменений с юга на север, а ситуацией очагово-дискретных преобразований фактически на всей исследуемой территории вне зависимости от позиции на субмеридиональном трансекте [Zolnikov et al., 2016].

При изучении отклика экосистем на разнонаправленные климатические тренды нужно учитывать тот факт, что распределение растительности тесно связано с неоднородностью окружающей среды [Arellano et al., 2017]. Как неоднократно отмечалось, изменения в экосистемах могут быть связаны с региональной изменчивостью климата, почвенного покрова, рельефа и режима увлажнения [Zolnikov et al., 2016; Bonney et al., 2018]. Различные сочетания рельефа и гидрологических условий часто объясняют большую часть наблюдаемой пространственной структуры растительности [Ding et al., 2018]. Таким образом, реакция экосистем на региональные изменения климата и антропогенный пресс в значительной степени контролируются геолого-геоморфологическим каркасом территории, который представляет собой формы и типы рельефа, а также слагающие его отложения.

Анализ роли рельефа в дифференциации компонентов ландшафта средствами ГИС и ДЗ занимает важное место в изучении особенностей их пространственного распределения. Этому вопросу уделяется все больше внимания [Гопп, 2007; Гопп и др., 2016; Помазкова, Абакумова, 2018; Чупина и др., 2018; и др.]. В том числе есть примеры изучения пространственной организации лесных экосистем с помощью методов геоморфометрии [Шарая, Шарый, 2011]. Развитие этого метода позволило осуществить локальное прогнозирование возможных экологических последствий предстоящего глобального потепления для высокогорных экосистем (на примере Приэльбрусья) с использованием вероятностной оценки поведения фитоценозов в различных геоморфологических и эдафических условиях [Коломыц, Шарая, 2012]. Существуют примеры использования методов машинного обучения на основе применения вспомогательных переменных (цифровые модели рельефа (ЦМР) и их производные, спутниковые снимки, климатические данные или другие измеренные параметры почвы из той же области) для прогнозирования параметров почв в районах, где отсутствуют данные [Tziachrisa et al., 2019].

Нами предлагается подход к прогнозному картографированию пространственной динамики экосистем при изменении климата на основе использования морфометрического анализа цифровой модели рельефа SRTM. Прогноз динамики экосистем на базе исследования ее геолого-геоморфологической основы предполагает рассмотрение функционального значения конкретных форм и типов рельефа, учитывая их динамические и статические свойства. Комплексирование этих данных с информацией по растительности и почвам делает возможным прогнозное моделирование пространственной динамики ПТК этой территории.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на примере Барабинской слабоволнистой гривно-озерной равнины (Барабы) на Обь-Иртышском междуречье. Региональной гидрологической особенностью этой равнины является большое количество мелководных, зачастую соленых озер. Причины этого явления – плоский рельеф, слабое развитие речной сети и бессточность территории. Питание водных объектов в значительной степени зависит от атмосферного увлажнения. Гидрогеологические условия таковы, что грунтовые воды в понижениях рельефа находятся близко у поверхности, а не просачиваются глубже, что предопределяет большое количество озер разной солёности и заболачивание отдельных участков.

Территория Барабы относится к лесостепной зоне и сочетает в себе степной и лесной типы растительности, при этом степи приурочены к плакорам, в то время как лес занимает понижения рельефа и представлен березовыми и березово-осиновыми колками. На разнообразии степных сообществ и их распределение в пространстве влияют многие экологические факторы. Основными из них являются увлажнение, засоление и опесчаненность почв, а также выпас домашнего скота [Королюк, 2014]. Увлажнение почв имеет первостепенное значение. Его изменение проявляется в структуре растительного покрова всех уровней организации. В связи с этим ПТК Барабы имеют высокую чувствительность к величине годовых осадков.

Интразональные ПТК здесь представлены сложной мозаикой степных сообществ и га-

лофитных лугов на солонцах и засоленных почвах, зарослей галофитов на солончаках, обсыхающими травяными болотами и тростниковыми займищами с болотными почвами. При этом пространственное распределение ПТК, как уже говорилось выше, определяется характером увлажнения, которое в значительной мере зависит от мезо- и микро- рельефа [Структура..., 1976]. Таким образом, геолого-геоморфологические условия в районе исследования определяют пространственную и структуру локальных ПТК. Соответственно, методика построена на сочетании ботанической, почвенной и гидрологической информации с данными по геолого-геоморфологическому каркасу исследуемой территории.

Методика прогнозного картографирования пространственно-временной динамики экосистем состоит из следующих этапов: 1) выделение геолого-геоморфологического каркаса, 2) ранжирование территории по степени авто- и гидроморфности, 3) прогноз трансформации

онных процессов, развивающихся в ПТК полученных выделов, 4) картографирование пространственно-временной динамики экосистем при разнонаправленных трендах климатического увлажнения.

Выделение геолого-геоморфологического каркаса представляет собой процедуру автоматического картографирования форм и типов рельефа, характерных для изучаемой территории, на основе морфометрического анализа рельефа [Чупина, Зольников, 2016]. Использовалась цифровая модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) с пространственным разрешением 3 арсекунды, которая находится в открытом доступе (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Построение и обработка морфометрических показателей производились в программном пакете ArcGIS 10.2.1. Методика схематично представлена на рис. 1. По ЦМР и выбранным морфометрическим показателям в автоматизированном режиме выделялись следующие формы рельефа, ха-

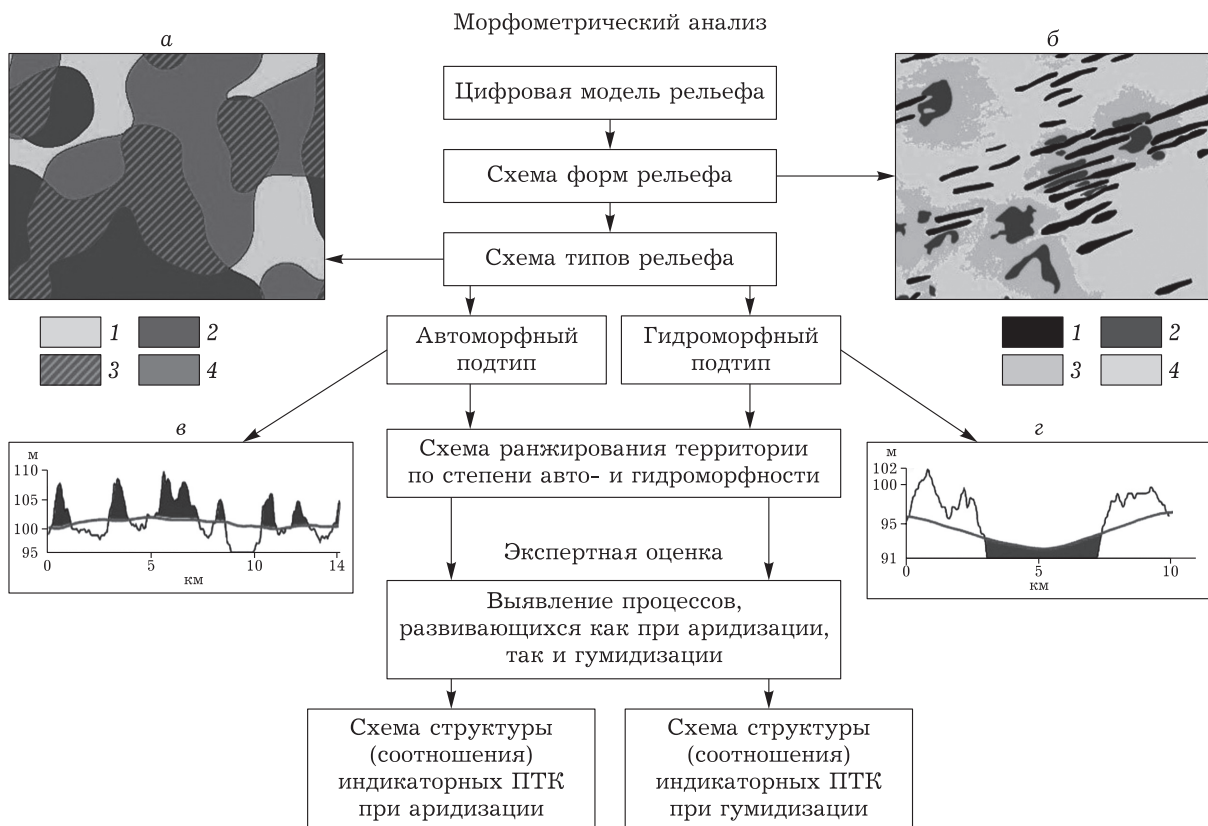


Рис. 1. Методика геоинформационного моделирования пространственно-временной динамики экосистем. а – типы рельефа (1 – гривный, 2 – озерный, 3 – гривно-озерный, 4 – пологоравнинный); б – формы рельефа (1 – гривы, 2 – озера, 3 – палеоозерные котловины, 4 – равнина); в – автоморфный подтип (закрашенная область); г – гидроморфный подтип (закрашенная область)

раактерные для данной территории: гривы, озерные котловины, равнина (рис. 1, б). Типы рельефа на указанной территории картографировались по удельному площадному соотношению доминирующих форм рельефа методом скользящего окна (рис. 1, а).

Ранжирование территории по степени авто- и гидроморфности. Как уже отмечалось выше, для пространственного распределения растительных сообществ на территории Барабинской равнины важную роль играют локальные условия увлажнения, которые, в свою очередь, зависят от мезо- и микро-рельефа. С целью отражения взаимосвязей рельефа и режима увлажнения ПТК в контексте данной работы мы использовали понятие автоморфности/гидроморфности местоположения, разделяя каждый из типов рельефа на два подтипа по характеру увлажнения. Для этого был разработан морфометрический показатель, отражающий вертикальный разброс высот относительно усредненной поверхности. В таком случае гидроморфным подтипам (рис. 1, г) соответствуют отрицательные значения и вогнутые формы рельефа, к которым приурочены ландшафты, испытывающие на себе влияние дополнительного поверхностного увлажнения и грунтовых вод, автоморфным подтипам – территории с положительными значениями этого показателя (рис. 1, в). Таким образом, получена схема ранжирования территории по степени автоморфности/гидроморфности.

Выявление динамических процессов, развивающихся на полученных выделах. Для получения картографической геоинформационной модели территории для разных климатических ситуаций необходимо было сделать прогноз, какие возможные изменения в пространственной структуре ПТК могут происходить для каждого из выделенных типов и подтипов рельефа в зависимости от тренда климатических изменений (аридизация/гумидизация). В работе применялся индикаторный метод, традиционно используемый при географических, гидрогеологических и ботанических исследованиях [Винокуров, 1980], который позволяет на примере отдельных объектов-индикаторов выявить определенные закономерности и отобразить их на картах-схемах. С этой целью мы выбрали биотические и абиотические индикаторы, ос-

новываясь на ранее полученных результатах [Meyer et al., 2008].

В качестве биотических индикаторов изменения климата мы используем такие типы растительности, как луга, болота, степи, леса. Изменения в растительном покрове связаны с динамикой гидрологического режима в зависимости от климатического тренда (аридизация/гумидизация). Характерные растительные сообщества замещаются соседними в топоординационных схемах растительности ценозами [Королюк, 2010]. Так, при повышении сухости на исследуемой территории вероятно увеличение площадей солонцеватых степей за счет солончаковатых лугов и сообществ однолетних галофитов, а при гумидизации – увеличение площади болот.

Построение моделей пространственно-временной динамики экосистем при разнонаправленных трендах климатического увлажнения. Несмотря на то что набор форм рельефа на данной территории невелик (озерные котловины, гривы, равнина), тем не менее можно проанализировать их сочетания в разных условиях увлажненности. Для того чтобы отразить гетерогенность и мозаичность ПТК Барабы, были подобраны 11 геоморфологических полигонов в разных условиях увлажнения (рис. 2). Отдельно в качестве типового выбран полигон 9 в районе оз. Чаны, который является крупным объектом с особыми геоморфологическими условиями: сочетание крупной палеоозерной котловины и вытянутых грив. Специфичным является также долинный комплекс с наличием озерных расширений (полигон 2). Периодически первая надпойменная терраса переходит в режим высокой поймы и заливадается водой, временами заболачивается. На юго-востоке показан участок (полигон 11), расположенный на возвышении (продолжение одного из увалов), а на юго-западе (полигон 10) – в самой низкой части Барабы. Для каждого из выбранных участков оценивалось соотношение форм рельефа и составлялся прогноз изменений в компонентном составе ПТК при различных климатических трендах.

Таким образом, мы сначала выделяем геолого-геоморфологический каркас. Затем рассматриваем функциональное значение конкретных форм и типов рельефа, учитывая их влияние на статические и динамические свойства эко-

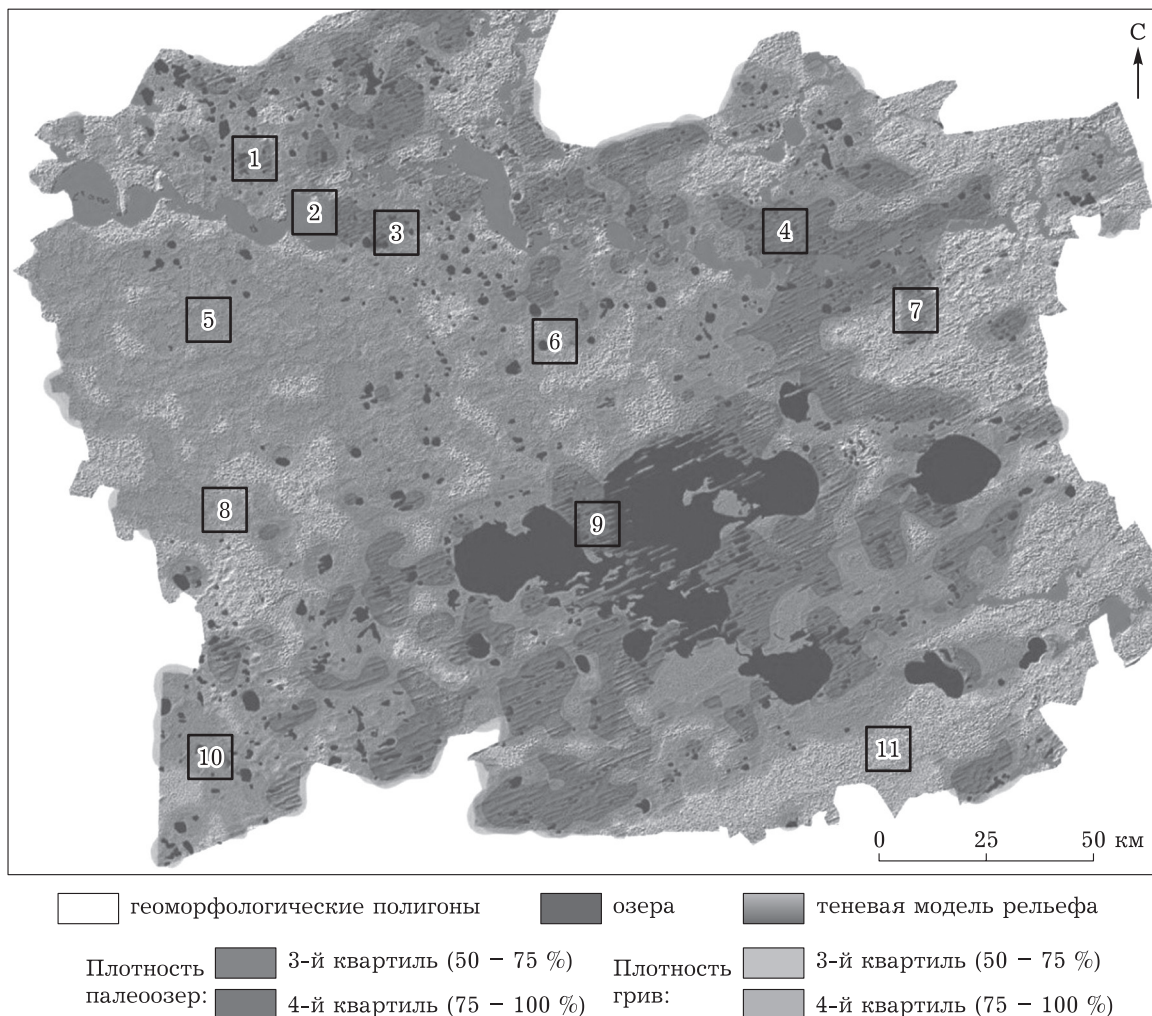


Рис. 2. Расположение геолого-геоморфологических полигонов на территории Барабы в разных условиях увлажнения

систем. Поскольку в своих прогнозных построениях мы рассматриваем изменение климата в контексте динамики увлажнения, то нам необходимо разделить территорию по степени гидроморфизма. Далее на основе экспертного мнения рассматриваются процессы, развивающиеся при аридизации и гумидизации, а также поведение индикаторных типов растительности с учетом уязвимости отдельных территорий к выявленным процессам. По экспертной оценке строятся прогнозные модели пространственно-временной динамики ПТК, которые затем и отображаются на картах-схемах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Дискретно-очаговые изменения в составе и структуре почвенно-растительного покрова

при различных климатических трендах рассмотрены нами на примере 11 разных полигонов, представленных на рис. 3, а данные по соотношению геоморфологических объектов сведены в табл. 1.

Обстановки гумидизации (см. рис. 3, участки 1, 4, 5, 9). К этим обстановкам относится самый северный увлажненный участок 1 с частичным заполнением водой палеоозерной котловины и заболачиванием остальной ее части. Заболоченность локальных понижений пологоволнистой поверхности наблюдается на участке 5, а на незаболоченной территории располагаются луговые сообщества. В таких увлажненных условиях лес занимает гривы (участок 9), а гидроморфные участки межгривных понижений активно заболачиваются (участок 4).

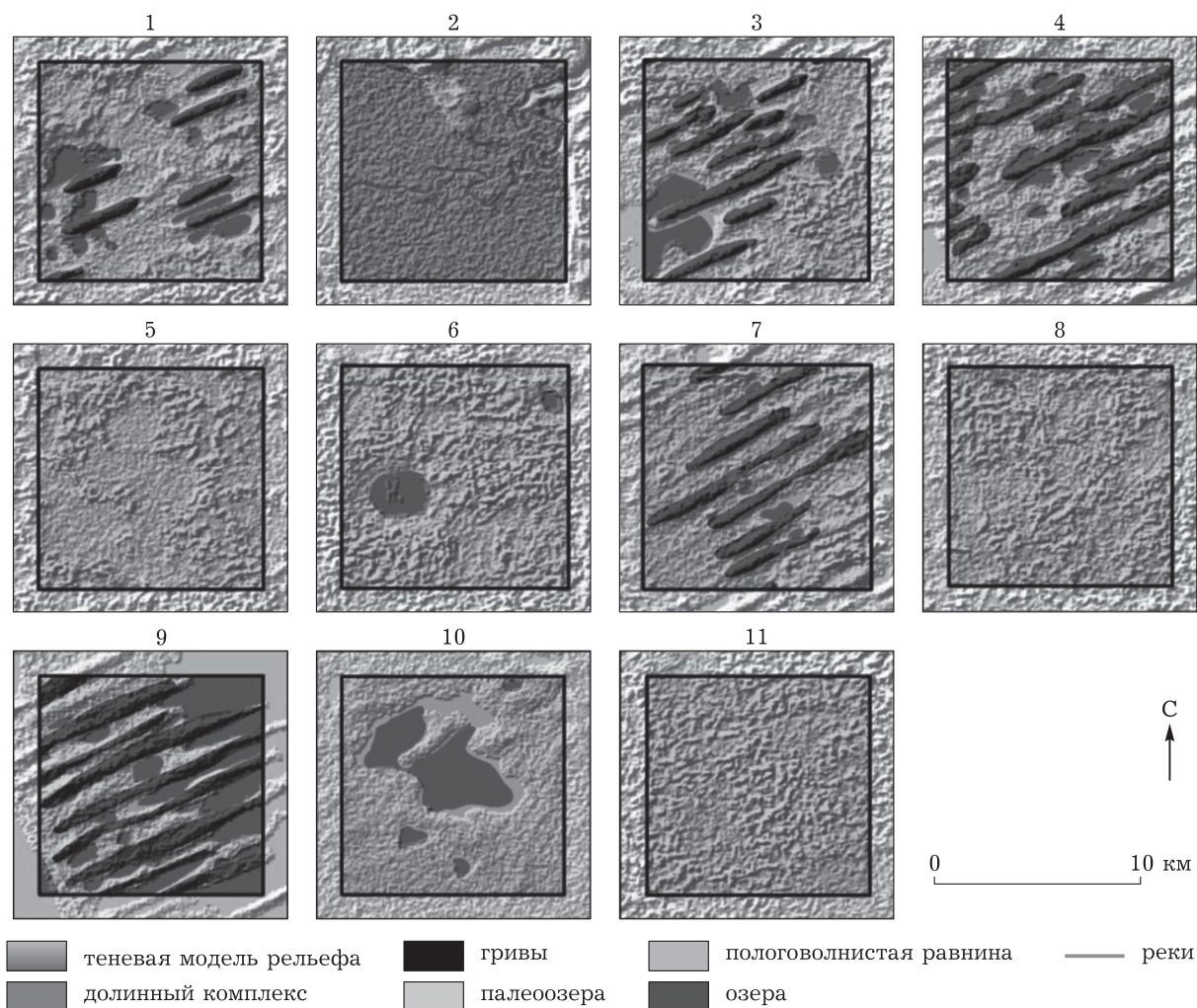


Рис. 3. Геолого-геоморфологические полигоны Барабы

Обстановки умеренного увлажнения (см. рис. 3, участки 2, 3, 6, 11). Для долинных ландшафтов (участок 2) характерна луговая растительность. На пологоволнистой водораздельной поверхности распространены луговые степи и остепненные луга (участок 11). Наиболее глубокие понижения рельефа водораздела заняты озерами и болотами (участки 3 и 6). Лес локализуется на узких гривах и склонах уплощенных сверху грив, а также фрагментарно на пологоволнистой равнине в зависимости от локальных флуктуаций высот.

Обстановки аридизации (см. рис. 3, участки 7, 8, 10) – это высохшие незаболоченные палеоозерные котловины с распространением солончаков (участок 8) и обсыхающие озера на наиболее низких высотных отметках (участок 10). Такие участки характеризуются доминированием степной расти-

тельности и развитием солонцеватых лугов на месте озер. Лесная растительность отсутствует даже на гривах (участок 7).

При анализе полигонов использовались формы рельефа, характерные для данной территории: гривы, озерные котловины, равнина, которые были выделены по цифровой модели рельефа и выбранным морфометрическим показателям в автоматизированном режиме. Дальнейшая статистическая обработка результатов позволила выделить на территории Барабы четыре типа рельефа. В нашей методике экспертная оценка показала, что эти четыре типа рельефа, а именно: гривный, равнинный, гривно-озерный, озерный, в указанной последовательности характеризуются уменьшением автоморфности и увеличением гидроморфности. Такие выводы были сделаны на основе предварительного изуче-

Соотношение геоморфологических объектов по полигонам в разных условиях увлажнения

Номер участка	Характеристика рельефа, индикаторные объекты/ обстановка увлажнения	Объекты, доля от площади, %				
		Долины	Гривы	Озера	Палео-озера	Равнины
1	Северная часть лесостепи, пологоволнистая равнина, мелкие гривы. Сильно заболоченные котловины палеоозер. Преобладание палеоозер, небольшие современные озера / Гумидизация	0,0	10,0	12,9	49,3	27,7
2	Озерное расширение речной долины. Долина (пойма + первая надпойменная терраса), узкое, сильно меандрирующее русло, старицы / Умеренное увлажнение	90,2	0,0	2,1	0,0	7,7
3	Гривно-озерный рельеф. Гривы, примыкающие к крупным палеоозерным котловинам, частично заполненным водой, на пологоволнистой равнине / Умеренное увлажнение	0,0	14,8	11,7	41,2	32,3
4	Северо-восточная часть Барабы. Крупные древние палеоозерные котловины, занятые типичным гривно-лощинным рельефом, местами заболоченные. Палеоозера, гривы, мелкие вытянутые озера, пологоволнистая равнина / Гумидизация	0,4	27,6	9,3	53,0	9,7
5	Северо-западная часть Барабы. Обсыхающие палеоозерные котловины, местами заболоченные. Палеоозера, пологоволнистая равнина / Гумидизация	0,0	0,0	0,0	44,8	55,2
6	Центральная часть Барабы. Палеоозерные котловины, частично заполненные водой. Пологоволнистая равнина, палеоозера, современные озера / Умеренное увлажнение	0,0	0,0	5,5	23,1	71,4
7	Типичный гривный рельеф на пологоволнистой равнине. Пологоволнистая равнина, гривы, небольшие современные озера / Аридизация	0,0	18,3	1,3	2,6	77,7
8	Западная часть Центральной Барабы. Высохшие палеоозерные котловины без современных озер. Палеоозера, пологоволнистая равнина / Аридизация	0,0	0,0	0,4	27,1	72,5
9	Центральная Бараба. Озеро Чаны. Гривы в пределах крупной палеоозерной котловины, местами болота и займища. Современное озеро, палеоозера / Гумидизация	0,0	35,7	31,6	32,8	0,0
10	Обсыхающие палеоозера, равнина / Аридизация	0,0	0,0	17,0	57,4	25,6
11	Пологоволнистая равнина. Переход от Барабы к Кулунде / Умеренное увлажнение	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0

ния карт четвертичных отложений и объяснительных записок к ним, а также на распределении высотных отметок. В свою очередь, каждый тип рельефа также подразделяется на два подтипа – автоморфный и гидроморфный. Таким образом, мы получили схему ранжирования территории по степени автоморфности/гидроморфности, состоящую из восьми градаций (рис. 4).

На основе экспертной оценки составлены прогнозы пространственно-временных изменений в ПТК, в том числе негативные экзогенные процессы, которые могут развиваться для каждого отдельного типа и подтипа рельефа в зависимости от климатического тренда. В структуре ПТК при гумидизации прогнози-

руются следующие пространственные изменения: затопление озерных котловин, заболачивание лугов, частичная трансформация степей в луга, увеличение гидроморфизма в почвах.

При положительном тренде климатического увлажнения (гумидизация) происходит затопление озерных котловин, заболачивание лугов, частичная трансформация степей в различные варианты лугов, увеличение гидроморфизма в почвах. При этом степень трансформации ПТК территорий с различным типом рельефа возрастает в такой последовательности: гривный, гривно-озерный, равнинный, озерный. В этом случае для гидроморфных участков степень уязвимости будет на градацию выше, чем для автоморфных.

участков, вплоть до полного высыхания современных озер с дальнейшим образованием солончаков; дефляционные и водно-эрозионные процессы на не закрепленных растительностью поверхностях [Meuer и др., 2008]. Интенсивность проявления этих процессов для разных типов рельефа и их подтипов может значительно различаться.

Полученные результаты показывают, как по-разному реагируют те или иные типы и подтипы рельефа Барабы в зависимости от тренда климатических изменений. При отрицательном тренде увлажнения (аридизация климата) сильно уязвимыми становятся автоморфные поверхности гривного рельефа, а также озерный рельеф в целом. Наиболее устойчивыми (наименее уязвимыми) являются территории с равнинным рельефом. Для них прогнозируется слабая и средняя степень трансформации ПТК как при отрицательном, так и при положительном тренде увлажнения (см. рис. 4). Территории с озерным рельефом являются наиболее уязвимыми как при гумидизации, так и при аридизации. Во влажные периоды они будут заполняться водой или заболачиваться, в засушливые – засоляться, а также подвергаться дефляционным процессам. Таким образом, ПТК на гидроморфных участках всех типов рельефа как при гумидизации, так и при аридизации климата подвергнутся наибольшему изменению. Автоморфные поверхности менее уязвимы при увлажнении и более уязвимы при иссушении. Поэтому тренд иссушения является наиболее опасным для ПТК юга Западно-Сибирской равнины. В табл. 2 отражены возможные процессы, развивающиеся при аридизации, с учетом оценки степени уязвимости для трансформаций: I – очень слабая, II – слабая, III – средняя, IV – сильная, V – очень сильная.

ОБСУЖДЕНИЕ

На основе данных о рельефе, его связи с растительностью и развитыми на них процессами проведено прогнозное картографирование природных обстановок в зависимости от условий увлажнения: минимальное (аридизация) и максимальное (гумидизация) (рис. 5). В условиях мозаичности структуры ПТК Барабинской равнины, обусловленной характером и степенью увлажнения, прогно-

зируется, что направление трансформации ПТК будет происходить в зависимости от типа рельефа и степени его автоморфности/гидроморфности. Таким образом, построены две геоинформационные модели пространственной динамики экосистем в зависимости от условий увлажнения: минимальное (иссушенное) и максимальное (см. рис. 5).

Усиление аридности климата на исследуемой территории вызовет дальнейшую деградацию гидроморфных участков всех типов рельефа, вплоть до полного высыхания современных озер (см. рис. 5, а). Так как подавляющее большинство озер содержит засоленные воды и рассолы, в результате их деградации образуются солончаки, площадь которых заметно возрастет. Озерные котловины, вышедшие в субаэральную стадию, не закреплены растительностью, поэтому на них будут активно развиваться дефляционные и водно-эрозионные процессы, что происходит в настоящее время в степном биоме ЗС [Чупина и др., 2018] и ряде других регионов. Сократится площадь лесной растительности. Масштаб проявления этих процессов при нарастании иссушения будет увеличиваться. Автоморфные ПТК при аридизации климата также дестабилизируются. Возможно уменьшение продуктивности растительных сообществ, снижение проективного покрытия растительности и ее почвозащитной роли. Усилится также и аридность почвенного климата. Все это приведет к активизации дефляционных процессов, а в случае экстремальности климата – и к водной эрозии.

В гидроморфных ПТК всех типов рельефа при условии нарастания климатического увлажнения будет происходить повышение уровня грунтовых вод с последующим заполнением всех палеоозерных котловин и заболачиванием прилегающих к ним территорий. Это будет сопровождаться также сокращением площадей солончаков и галофитной растительности. Таким образом, прогнозируются наибольшая степень трансформации для озерного типа рельефа и изменение соотношения вода/суша на исследуемой территории в пользу водной поверхности (см. рис. 5, б). Наименьшую трансформацию при гумидизации климата будут испытывать ПТК на автоморфных участках гривного рельефа, например олуговение степей (настоящие степи

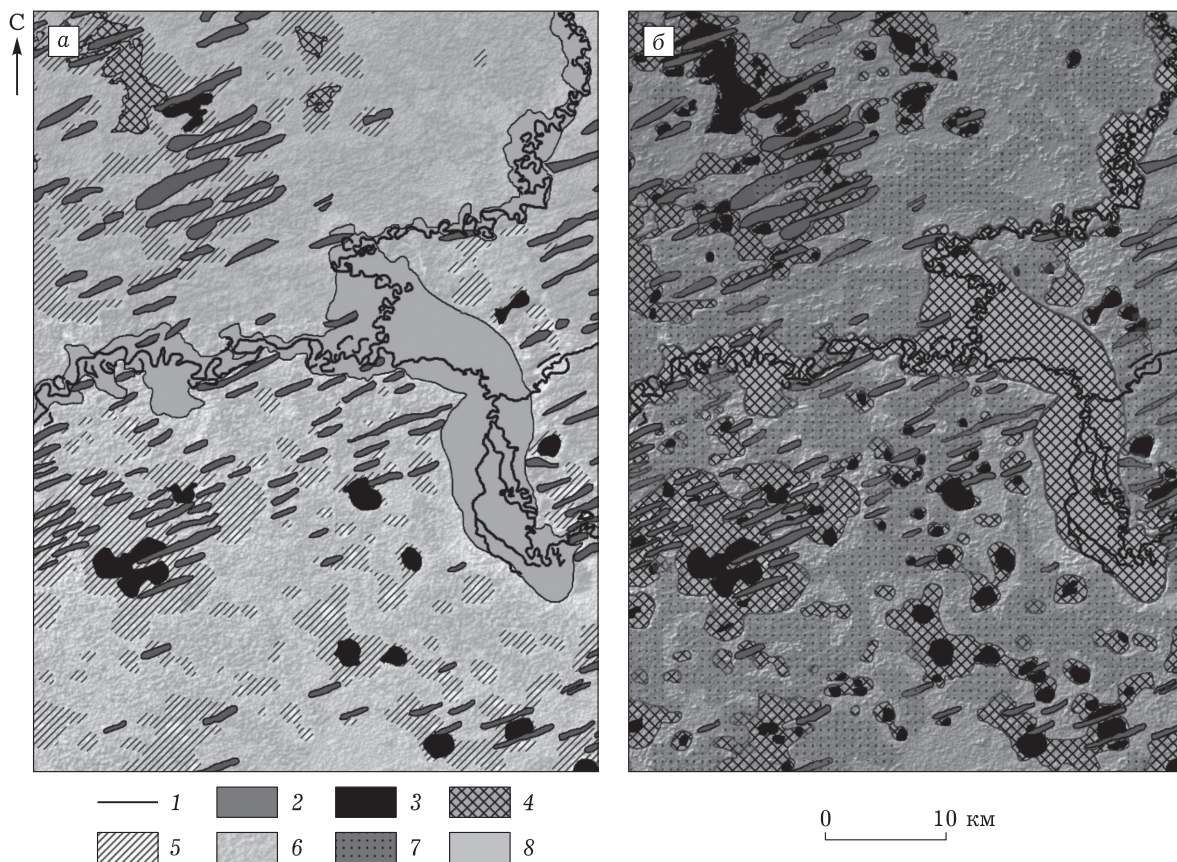


Рис. 5. Фрагмент карты-схемы пространственно-временной динамики экосистем: а – при аридизации; б – при гумидизации.

1 – гидросеть; 2 – степи на гривах; 3 – озера; 4 – болота, заболачиваемые участки; 5 – солончаки; 6 – степи; 7 – леса; 8 – луга

переходят в луговые степи или остепненные луга). Для автоморфных ПТК равнинного типа рельефа возможно повышение уровня грунтовых вод. Нарастание грунтового увлажнения приведет к частичной или полной смене типа растительности: например, луговая степь – луг, при максимальных уровнях вероятно слабое переувлажнение автоморфных участков на границе с гидроморфными. В целом же при положительном тренде увлажнения для ПТК автоморфных участков гривного и гривно-озерного рельефа возможность трансформации незначительная.

При максимальном иссушении будет отсутствовать большая часть современных озер и болот, широко распространены солончаки. Приречные озерные расширения перейдут в режим первой надпойменной террасы, на которой будут развиваться луга. Прогнозируется деградация лесной растительности, вплоть до полного ее исчезновения. На про-

странствах пологоволнистой равнины, в настоящее время занятой различными лугами, произойдет остепнение последних.

При максимальной гумидизации автоморфные участки всех типов рельефа со степной растительностью и автоморфными почвами трансформируются в ПТК с полугидроморфными почвами и луговой растительностью. Реки станут более полноводными, поэтому озеровидные приречные расширения и первая надпойменная терраса перейдут в режим высокой или регулярно затапливаемой поймы или начнут заболачиваться.

Таким образом, прогнозное картографирование на основе ГИС и ДЗ подтверждает гипотезу об очагово-дискретном характере пространственных изменений ПТК в лесостепной зоне ЗС при различных климатических трендах. Это необходимо учитывать как при палеогеографических реконструкциях, так и при составлении региональных прогнозов динамики экосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика позволяет прогнозировать пространственно-временную динамику экосистем при разнонаправленных трендах климатического увлажнения в субаридных условиях и визуализировать результаты в виде карт-схем. Методика базируется на анализе геоморфологического каркаса, полученного по ЦМР SRTM, а также экспертной оценке процессов, которые могут развиваться для каждого отдельного типа и подтипа рельефа в зависимости от климатического тренда. В работе рассмотрена неоднородность и дискретно-очаговые изменения в составе и структуре почвенно-растительного покрова Барабы на примере 11 разных полигонов. Построена схема ранжирования территории по степени гидроморфности, которая позволяет более детально учитывать особенности локальных ПТК.

Построенные итоговые карты-схемы хорошо отражают пространственную гетерогенность возможных трансформационных преобразований экосистем, а также позволяют делать прогноз изменений для любого уровня организации ПТК – как локального, так и регионального. Комплексный подход и использование индикаторного метода увеличивает надежность и адекватность предлагаемых сценариев. В дальнейшем этот подход позволяет перейти к количественной оценке изменений в пространственной структуре ПТК. Это, в свою очередь, имеет большое практическое значение в связи с усилением аридности и экстремальности климата на юге Сибири.

Однако предложенная методика апробирована на данный момент только на территории Барабинской равнины, с ее конкретным набором форм и типов рельефа и однородной литогенной основой. Для регионов с неоднородной литогенной основой и иным влиянием рельефа на распределение ПТК закономерности пространственного распределения наиболее уязвимых территорий могут быть другими. Соответственно для составления аналогичных схем для других регионов необходима корректировка и/или доработка данной методики.

Работа выполнена в соответствии с государственными заданиями ИГМ СО РАН и ИПА СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Винокуров Ю. И. Ландшафтные индикаторы инженерно- и гидрогеологических условий Предалтайских равнин. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 192 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. М.: Росгидромет, 2014. 94 с.
- Глушкова Н. В., Чупина Д. А., Пчельников Д. В., Болдырев И. И., Селятицкая Н. А. Картографирование и мониторинг процессов аридизации на юге Западно-Сибирской равнины // География и природ. ресурсы. 2016. № 1. С. 133–140.
- Гопп Н. В. Анализ количественных характеристик компонентов ландшафта, рассчитываемых по многозональной и радиолокационной съемке // Сиб. экол. журн. 2007. № 5. С. 859–869.
- Гопп Н. В., Нечаева Т. В., Савенков О. А., Смирнова Н. В., Смирнов В. В. Оценка влияния мезорельефа склона на пространственную изменчивость свойств почвы и характеристики растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли // Исследование Земли из космоса. 2016. № 3. С. 66–74.
- Жилич С. В., Рудая Н. А., Кривоногов С. К. Изменение растительности и климата в районе озера Малые Чаны в позднем голоцене // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2016. Т. 7, № 1. С. 68–75.
- Зольников И. Д., Глушкова Н. В., Лямина В. А., Смоленцева Е. Н., Королюк А. Ю., Безуглова Н. Н., Зинченко Г. С., Пузанов А. В. Индикация динамики природно-территориальных комплексов юга Западной Сибири в связи с изменениями климата // География и природ. ресурсы. 2011. № 2. С. 155–160.
- Им С. Т., Харук В. И., Ракитянская Н. М., Голуков А. С. Климатогенная динамика озер в экотоне лесостепи Забайкалья // Сиб. экол. журн. 2015. № 6. С. 823–831. [Im S. T., Kharuk V. I., Rakityanskaya N. M., Golyukov A. S. Climate-induced lake dynamics in the Trans-Baikal forest-steppe ecotone // Contemporary Problems of Ecology. 2015. Vol. 8, N 6. P. 680–686.]
- Коломыц Э. Г., Шарая Л. С. Прогностное моделирование высокогорных экосистем в свете глобальных изменений климата // Экология. 2012. № 1. С. 3–15. [Kolomyts E. G., Sharaya L. S. Prognostic simulation of alpine ecosystems in view of global climate change // Rus. J. Ecol. 2012. Vol. 43, N 1. P. 1–12.]
- Королюк А. Ю. Проявление динамики экосистем в пространственной структуре растительного покрова на юге Западной Сибири // Растит. мир Азиат. России. 2010. № 2(6). С. 12–16.
- Королюк А. Ю. Сообщества класса Festuco-Brometea на территории Западно-Сибирской равнины // Растительность России. СПб., 2014. № 25. С. 45–70.
- Куликов А. И., Убугунов Л. Л., Мангатаев А. Ц. О глобальном изменении климата и его экосистемных следствиях // Аридные экосистемы. 2014. № 3. С. 5–14. [Kulikov A. I., Ubugunov L. L., Mangataev A. Ts. Global climate change and its impact on ecosystems // Arid Ecosystems. 2014. Vol. 4, N 3. P. 135–141.]
- Помазкова Н. И., Абакумова В. Ю. Анализ роли рельефа в пространственной дифференциации ландшафтов с использованием геоинформационных и статистических методов // Сиб. экол. журн. 2018. № 2.

- C. 158–172. [Pomazkova N. I., Abakumova V. Yu. Analysis of the Role of Topography in the Spatial Differentiation of Landscapes Using Geoinformation and Statistical Methods // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11, N 2. P.137–149.]
- Румянцев В. Ю., Малхазова С. М., Леонова Н. Б., Солдатов М. С. Прогноз возможных изменений зональных границ растительности Европейской и Западной Сибири в связи с глобальным потеплением климата // *Сиб. экол. журн.* 2013. № 4. С. 449–458. [Rumiantsev V. Yu., Malkhazova S. M., Leonova N. B., Soldatov M. S. Forecasting possible changes in zonal vegetation boundaries in European Russia and Western Siberia in connection with global warming // *Contemporary Problems of Ecology*. 2013. Vol. 6, N 4. P. 343–349.]
- Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы / отв. ред. Р. В. Ковалев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 496 с.
- Чебакова Н. М., Рейнфельдт Дж., Парфенова Е. И. Перераспределение растительных зон и популяций лиственницы сибирской и сосны обыкновенной при потеплении климата // *Сиб. экол. журн.* 2003. № 6. С. 677–686.
- Чупина Д. А., Зольников И. Д. Геоинформационное картографирование форм и типов рельефа на основе морфометрического анализа // *Геодезия и картография*. 2016. № 6. С. 35–43.
- Чупина Д. А., Зольников И. Д., Смоленцева Е. Н., Лашинский Н. Н., Никулина А. В., Картозия А. А. Геоинформационное картографирование территории по реакции к иссушению и увлажнению (юг Западно-Сибирской равнины) // *Изв. РАН. Сер. географ.* 2018. № 5. С. 81–90.
- Шарая Л. С., Шарый П. А. Изучение пространственной организации лесных экосистем с помощью методов геоморфометрии // *Экология*. 2011. № 1. С. 3–10. [Sharaya L. S., Sharyi P. A. Geomorphometric study of the spatial organization of forest ecosystems // *Rus. J. Ecol.* 2011. Vol. 42, N 1. P. 1–8.]
- Arellano M. N., Umaña M. J., Macía M. I., Loza A. Fuentes, V. Cala, P. M. Jørgensen. The role of niche overlap, environmental heterogeneity, landscape roughness and productivity in shaping species abundance distributions along the Amazon–Andes gradient // *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2017. Vol. 26. P. 191–202.
- Bonney M. T., Danby R. K., Treitz P. M. Landscape variability of vegetation change across the forest to tundra transition of central Canada // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 217. P. 18–29.
- Ding J., Johnson E. A., Martin Y. E. Linking soil moisture variation and abundance of plants to geomorphic processes: a generalized model for erosion-uplifting landscapes // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2018. Vol. 123. P. 960–975.
- Gabrielsen C. G., Murphy M. A., Evans J. S. Using a multi-scale, probabilistic approach to identify spatial-temporal wetland gradients // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 184. P. 522–538.
- Meyer B. C., Schreiner V., Smolentseva E. N., Smolentsev B. A. Indicators of desertification in the Kulunda steppe in the south of Western Siberia // *Arch. Agr. and Soil Sci.* 2008. Vol. 54, N 6. P. 585–603.
- Nikulina A. V. GIS-based analysis of settlement patterns for the central Baraba Lowland (Western Siberia, Russia) in relation to climatic conditions of the Middle – Late Holocene // *J. Archaeolog. Sci.: Rep.* 2019. Vol. 24. P. 302–312.
- Pravaliu R., Sirodov I., Peptenatu D. Changes in the forest ecosystems in areas impacted by aridization in south-western Romania // *J. Environ. Health Sci. Eng.* 2014. Vol. 12. P. 2.
- Tziachris P., Aschonitisa V., Chatzistathisa T., Papadopoulou M. Assessment of spatial hybrid methods for predicting soil organic matter using DEM derivatives and soil parameters // *Catena*. 2019. March. Vol. 174. P. 206–216.
- Wei C., Dirk K. N., Wilson A. M. Spatial detection of alpine treeline ecotones in the Western United States // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 240. P. 15–32.
- Zolnikov I. D., Glushkova N. V., Smolentseva E. N., Chupina D. A., Pchel'nikov D. V., Lyamina V. A. GIS and Remote Sensing Data-Based Methods for Monitoring Water and Soil Objects in the Steppe Biome of Western Siberia. Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia / Eds. Mueller, Lothar, Sheudshen, Askhad K., Eulenstein, Frank. Springer, 2016. P. 253–268.

Predictive mapping of spatial dynamics in semi-arid ecosystems under multidirectional trends of climate moisture

D. A. CHUPINA¹, I. D. ZOLNIKOV¹, E. N. SMOLENTSEVA²

¹*V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of SB RAS
630090, Novosibirsk, pr-t Akademika Koptyuga, 3
E-mail: chupina_da@igm.nsc.ru*

²*Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB RAS
630090, Novosibirsk, pr-t Akademika Lavrentieva, 8/2
E-mail: parabraunerde@rambler.ru*

The approach to modeling spatial dynamics of forest-steppe ecosystems under climate change is proposed. It based on using morphometric analysis of the digital elevation model (SRTM). The forecast is grounded on the analysis of the geological and geomorphological ecosystems framework. At the same time the functional significance of landforms and their impact on the static and dynamic properties of ecosystems are considered. The obtained results show flat areas are the most resistant to climate change, while lake areas are vulnerable to intensification of humidification or aridification. Predictive mapping based on GIS and RS confirm the existing ideas about the discrete mosaic character of changes in the forest-steppe of Western Siberia under different climate trends.

Key words: predictive mapping, spatial dynamics, climate change, digital terrain models, SRTM.