

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

УДК 528/551

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ПО РЕАКЦИИ К ИССУШЕНИЮ И УВЛАЖНЕНИЮ (ЮГ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ РАВНИНЫ)

© 2018 г. Д. А. Чупина^{1,2,*}, И. Д. Зольников^{1,2,5}, Е. Н. Смоленцева³,
Н. Н. Лащинский⁴, А. В. Никулина^{1,2,5}, А. А. Картозия¹

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴ Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵ Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: chupina_da@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 28.02.2017 г.

Принята в печать 29.05.2018 г.

В статье предложена методика геоинформационного картографирования территории по степени уязвимости к процессам иссушения/увлажнения, базирующаяся на сочетании различной тематической информации (палеогеографической, ландшафтной, археологической, геоботанической) с характеристиками геоморфологического каркаса, построенного по цифровой модели рельефа SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). Район исследования расположен на Барабинской равнине, для которой характерно близкое расположение к поверхности грунтовых вод. Взаимосвязь параметров рельефа и увлажнения (грунтового и атмосферного) рассматривалось нами через понятие автоморфность/гидроморфность, на основе полученного по цифровой модели рельефа показателя относительных превышений рельефа. С использованием этого показателя построены две схемы уязвимости территории для четырех типов рельефа (грядового, равнинного, грядно-озерного, озерного) отдельно для двух случаев: иссушения и увлажнения (аридизации и гумидизации климата). Полученные схемы отображают районы, которые наиболее уязвимы при активизации экзогенных процессов, обусловленных климатическими изменениями. В результате исследования был сделан вывод о том, что автоморфные поверхности менее уязвимы при увлажнении и более уязвимы при иссушении. В то же время, гидроморфные участки всех типов рельефа являются уязвимыми при нарастании как увлажнения, так и иссушения. Таким образом, тренд иссушения является наиболее опасным для юга Западно-Сибирской равнины. Новизной этих моделей является возможность оценить степень трансформации наземных экосистем одновременно на всей площади территории и локально по каждому ее участку на среднемасштабном уровне исследования. Предложенная методика позволяет скорректировать прогнозные модели и палеогеографические реконструкции в зависимости от ландшафтных особенностей территории.

Ключевые слова: аридизация, цифровые модели рельефа, SRTM, индикаторы, уязвимость наземных экосистем, автоморфность, гидроморфность, прогнозные модели

DOI: 10.1134/S2587556618050047

Введение. На рубеже XX–XXI вв. в число приоритетных научных направлений вошло исследование глобальных изменений природной среды и климата. Существенное значение в рамках этого направления придается прогнозным моделям, которые, как правило, визуализируются в виде карт и схем. В прогнозных построениях используются данные о природных обстановках и климатических изменениях прошлого. Поскольку период инструментального мониторинга природной среды и климата насчитывает немногим более ста лет, то информацию о более далеком

прошлом получают при помощи изучения геологической летописи. Для территории Западной Сибири первые прогнозные сценарии на первую треть XXI в. [2, 3], были реализованы с использованием принципа палеоклиматических аналогий [4]. В качестве прогнозных моделей трансформации современных экосистем выступали палеогеографические реконструкции обстановок природной среды на определенные хроностратиграфические срезы – палеоаналоги прогнозируемого будущего.

Существенным вкладом в архив палеогеографических реконструкций региона стало обобщение [3], где была опубликована серия палеогеографических карт-схем, отражающих пространственное распределение растительности на территории Западной Сибири в эпохи палеоклиматических экстремумов (наиболее интенсивных похолоданий и потеплений). Эти палеогеографические реконструкции в значительной мере опираются на представления о субмеридиональном смещении границ ландшафтных зон и подзон в ответ на циклические колебания климата: к югу при похолодании, к северу при потеплении. Однако, впоследствии было установлено [7], что современные быстро протекающие трансформации природно-территориальных комплексов (ПТК) более адекватно характеризуются не моделью постепенного смещения границ ландшафтных зон и подзон в субмеридиональном направлении, а моделью очагово-дискретных преобразований ПТК фактически на всей территории. В этом проявилось эмерджентное отличие отклика экосистем региона на климатические сигналы различной длительности (коротко-, средне- и длиннопериодические климатические циклы), что ставит под сомнение адекватность прогнозных сценариев на основе палеогеографических схем, обобщающих обстановки природной среды для эпох значительной длительности.

Вышеизложенный вывод находит свое подтверждение в том, что имеется возможность верифицировать один из прогнозных сценариев [2], который был сделан на 2000 г. Палеоклиматическим аналогом в данном случае выступал климатический оптимум голоцена длительностью около 500 лет (6–5.5 тыс. л.н.). Согласно сценарию, в 2000 г. по сравнению с 1993 г. предполагалось потепление и увлажнение климата Западной Сибири, в частности для лесостепной зоны увеличение количества осадков на 100 мм; при этом резких трансформаций ландшафтов не прогнозировалось. Этот прогноз в 2000 г. не подтвердился. Более того, последующие мониторинговые исследования динамики ключевых показателей ПТК в зависимости от изменения климата на юге Западно-Сибирской равнины [9, 10] показали, что здесь на фоне коротко периодичных колебаний атмосферного увлажнения имеет место долговременная тенденция к иссушению территории. Таким образом, стала очевидной необходимость методической оптимизации подхода к палеогеографическому картографированию для прогноза изменений природной среды на основе палеоаналогов.

На наш взгляд, для территории, занятой лесостепной зоной, на юге Западно-Сибирской равнины большое значение имеет изучение палеобстановок природной среды в голоцене, т.е. в течение последних 11.5 тыс. лет. Именно на

протяжении последнего межледникового существовали ландшафты наиболее близкие к современным. Вместе с тем эти ландшафты существенно отличались друг от друга в разные эпохи голоцена, что обуславливалось палеоклиматической динамикой [3, 13]. Однако, на сегодняшний день палеонтологических (прежде всего палинологических) и геохронологических (прежде всего радиоуглеродных) данных пока еще недостаточно для создания на эти эпохи не только региональных, но даже и обзорных палеоландшафтных схем. В связи с этим особый интерес приобретает выявление региональных закономерностей поведения биоты, и прежде всего растительности, в конкретных геолого-геоморфологических условиях в зависимости от климатических изменений. Таким образом, подход к прогнозу динамики природной среды на основе палеоаналогов должен быть дополнен более детальным картографированием геолого-геоморфологической основы ландшафтов, выявлением биотических и абиотических индикаторов, характеризующих обстановки природной среды в разных климатических ситуациях.

Методика и фактический материал. Район исследования расположен в пределах Барабинской слабоволнистой гривно-озерной равнины на Обь-Иртышском междуречье Западно-Сибирской равнины. Эта территория относится к лесостепной зоне, которая сочетает в себе степной и лесной типы растительности, при этом степи приурочены к плакорам, в то время как лес занимает микропонижения и представлен в виде березовых колков [5]. Интразональная растительность Барабинской лесостепи представлена болотно-солончаковыми, солонцово-солончаковыми и остепненными лугами межгривных понижений, обсыхающими травяными болотами, галофитными сообществами [15].

Методика построена на сочетании геологической (палеогеографической) и археологической информации с данными по геолого-геоморфологическому каркасу исследуемой территории. Также нами применялся индикаторный метод, традиционно используемый при географических, гидрогеологических и ботанических исследованиях [5], который позволяет на примере отдельных объектов-индикаторов выявить определенные закономерности и отобразить их на картосхемах. Методика геоинформационного картографирования территории по степени уязвимости к процессам иссушения/увлажнения включает определенную последовательность действий: 1) построение схемы форм рельефа, 2) подбор абиотических и биотических индикаторов, 3) выявление закономерностей поведения индикаторов, 4) построение схемы ранжирования территории по степени уязвимости к процессам иссушения/увлажнения климата.

Для картографирования геолого-геоморфологического каркаса была использована методика на основе морфометрического анализа рельефа [16]. В качестве основы используется цифровая модель рельефа SRTM с пространственным разрешением 3 арксекунды, которая находится в открытом доступе (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Построение и обработка морфометрических показателей производились в программном пакете ArcGIS 10.2.1. Подготовительный этап включал в себя анализ карт четвертичных отложений и объяснительных записок к ним для выявления особенностей рельефа. Рельеф исследуемой территории состоит в основном из грив, озерных котловин (современных и палео), приречных озеровидных расширений и полого-волнистой равнинной поверхности, в различной степени осложненной мелкими холмами и суффузионно-просадочными западинами. Речные долины редки на этой территории и не занимают значительных площадей.

Построение схемы форм рельефа. В контексте палеоклиматических и палеогеографических исследований изучение рельефа имеет большое значение, так как он с одной стороны являлся структурным каркасом современных и палеоландшафтов, а с другой — содержит в себе информацию об изменениях палеосреды. Для выделения основных форм рельефа на данной территории эффективными морфометрическими показателями стали углы и азимуты падения склонов, средние значения углов, плотность ребер рельефа, относительные превышения высот. Водные поверхности современных озер были выделены по значениям углов и азимутов как абсолютно плоские участки; днища сухих и заболоченных озерных котловин (в том числе приречные озеровидные расширения), а также гривы выделены на основе статистического распределения значений относительных превышений рельефа. С меньшей точностью котловины выделялись по таким показателям как диапазон углов наклона склонов и диапазон высот, а гривы — по азимутам падения склонов (экспозиции склонов). Таким образом, были получены контуры всех форм рельефа, выявленных на предварительном этапе: гривы, котловины, полого-волнистая равнина. При этом котловины были разделены на два типа по уровню заполнения водой: современный уровень их заполнения (водное зеркало озера отображается на цифровой модели рельефа как абсолютно плоская поверхность) и максимально возможный, соответствующий бровкам палеоозерных котловин. Полученная схема палеоозер хорошо согласуется с данными государственных геологических карт четвертичных отложений масштаба 1:200 000, где они показаны как озерные и озерно-болотные отложения голоцена [8]. Болота выделены по топографическим картам масштаба 1:100 000. Аллювиальный комплекс был оконту-

рен вручную по цифровой модели рельефа (ЦМР) с использованием карты четвертичных отложений. Для выделения контуров лесной растительности использовались база данных цифровой топографической карты миллионного масштаба и космические снимки Landsat.

Подбор абиотических и биотических индикаторов. В качестве абиотического показателя изменения природной среды могут служить озера, значительно зависящие от условий иссушения/увлажнения, поскольку на данной территории их основное питание представлено атмосферными осадками и условия увлажнения оказывают значительное влияние на уровень воды в них [1, 19]. Согласно [18, 20] для последних 200 лет есть свидетельства значительных колебаний уровня воды в озерах, вплоть до полного их высыхания.

Одной из ландшафтных особенностей исследуемой территории является близкое залегание к поверхности грунтовых вод. Поэтому на пространственное распределение ПТК, прежде всего, растительности, оказывает влияние рельеф и количество выпадающих осадков, увеличение которых может вызвать поднятие грунтовых вод. Взаимосвязь параметров рельефа и грунтового увлажнения можно отразить через понятия автоморфность и гидроморфность. В контексте данной статьи предложен показатель, который вычисляется на основе ЦМР и строится как отклонение высот от геоморфологического тренда. Таким образом, гидроморфным участкам соответствуют вогнутые формы рельефа, к которым приурочены ПТК, испытывающие на себе влияние дополнительного поверхностного увлажнения и грунтовых вод, к автоморфным — ПТК, развивающиеся вне связи с грунтовыми водами и при нормальном атмосферном увлажнении.

В качестве дополнительного индикатора для оценки изменения растительности в голоцене мы используем археологические данные [12]. В нашем случае древние люди выступают как исторический критерий изменений палеосреды (прежде всего, условий увлажнения/иссушения), поскольку изменения кормящего ландшафта приводило к смене предпочтений для поселения на тех или иных формах рельефа. Растительность на изучаемой территории чутко реагирует на динамику увлажнения, а люди — на динамику растительности. Последние 10 тыс. лет на юге Западно-Сибирской равнины имели место как аридные, так и плейстоценовые эпохи. В засушливых условиях поселенческие памятники располагались ближе к рекам (озерам), в увлажненные эпохи — на более высоких геоморфологических позициях. Наиболее интересными индикаторами являются памятники, диагностированные с точностью до культурной принадлежности. Поскольку их возраст более точен и может быть скоррелирован с

другими данными (палинологическими, радиоуглеродными и др.), их тип хозяйствования и механизм адаптации к кормящему ландшафту дает дополнительную информацию о природных обстановках того времени. Хозяйственная деятельность человека в древние эпохи тесно связана с палеоландшафтами, и определяющим фактором для локализации местообитаний на исследуемой территории была растительность, изменявшаяся из-за динамики влажности. В качестве биотических индикаторов изменения климата мы используем такие обобщенные типы растительности как луга, болота, степи, леса.

Изменения в растительном покрове, связанные с динамикой гидрологического режима чаще всего носят постепенный характер и в зависимости от климатического тренда (уменьшение или увеличение количества осадков) характерные растительные сообщества замещаются соседствующими в схеме ценозов [11]. 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.

Выявление закономерностей поведения индикаторов. Анализ поведения индикаторов проводился как визуально по тематическим слоям ГИС-проекта, так и с использованием инструментов статистического анализа, оверлейных операций. Для котловин озер проводилось сравнение уровней их современной заполненности, с максимально возможным их заполнением. На основе показателя относительных превышений высот анализировалась их постепенная заполняемость при возможном увеличении увлажнения.

Работа с археологическими данными включала в себя анализ абсолютных высот, на которых расположены поселенческие памятники; анализ их геоморфологической приуроченности; расчет расстояний до предполагаемых источников воды (дополнительно оцифровывались отмершие меандры рек); расчет высоты до уреза воды; выборки из памятников с известной культурной принадлежностью сравнивались по ареалам распространения (среднеквадратическое отклонение и средние значения).

Получение схемы ранжирования территории по степени уязвимости к процессам иссушения/увлажнения. Динамика климатического увлажнения территории опасна как сама по себе, так последствиями: при изменениях влажности активизируется ряд экзогенных процессов (ветровая и водная эрозия почв, плоскостной смыв), а также происходит засоление-рассоление почвенно-грунтовой толщи [21]. Основой, на которой разрабатывалась схема уязвимости территории к таким экзогенным процессам, является ее геолого-

геоморфологический каркас. Он представлен в виде схем форм и типов рельефа, построенных в соответствии с разработанной ранее методикой [16]. Каждый тип рельефа отдельно анализировался на автоморфность/гидроморфность, поскольку гидроморфные участки наиболее уязвимы при нарастании гумидности климата, т.е. увеличении количества годовых осадков, а автоморфные — при усилении аридности климата, т.е. при снижении количества атмосферных осадков. В первом случае возможно развитие таких экзогенных процессов как затопление водой, заболачивание и т.д., а во втором случае — плоскостной смыв, ветровая эрозия почв. В результате получается итоговая схема уязвимости территории для природных процессов, активизирующихся при изменении климата.

Результаты и их обсуждение. Абиотические индикаторы — озера. В предыдущих исследованиях нами было установлено, что площади палеозер на порядок превышают площади современных озер [7]. В этой статье более детально рассмотрены отличия современных и древних озер на основе морфометрического показателя относительных превышений рельефа. Построив показатель относительных превышений рельефа, мы получили условную схему автоморфности/гидроморфности рельефа для всей территории, на основе чего были выделены палеоозерные поверхности (отрицательные отклонения от тренда рельефа). Схема полученных форм рельефа для данной территории представлена на рис. 1а. Затем для совокупности выделенных участков, строился тренд рельефа. Отклонения от этого тренда использовались для анализа степени заполнения озер в зависимости от степени климатического увлажнения территории (рис. 1б). На рис. 1б видно, что рельеф озерных палеоповерхностей не является однородным. Перепады составляют в среднем плюс-минус 3 м. Значения, вышедшие за пределы этого диапазона, являются редкими аномалиями, которыми можно пренебречь. Большая часть поверхности палеозер осложнена микрорельефом. Например, на участке № 1 рис. 1в показаны дюны и береговые валы, а также древние береговые уровни. На участке № 2 рис. 1в наоборот современных озер не наблюдается, только пологоволнистая равнинная поверхность с наиболее вероятными местами возникновения озер. На участке № 3 рис. 1в видно, как когда-то единое палеозеро разделилось на цепочку мелких озер преимущественно изометричной формы. На участке № 4 рис. 1в показаны современные озера межгрядных понижений, которые располагаются за пределами древних озер, а поверхность палеозер, расположенных рядом, имеет полого-волнистый микрорельеф без четко выраженных углублений или возвышений.

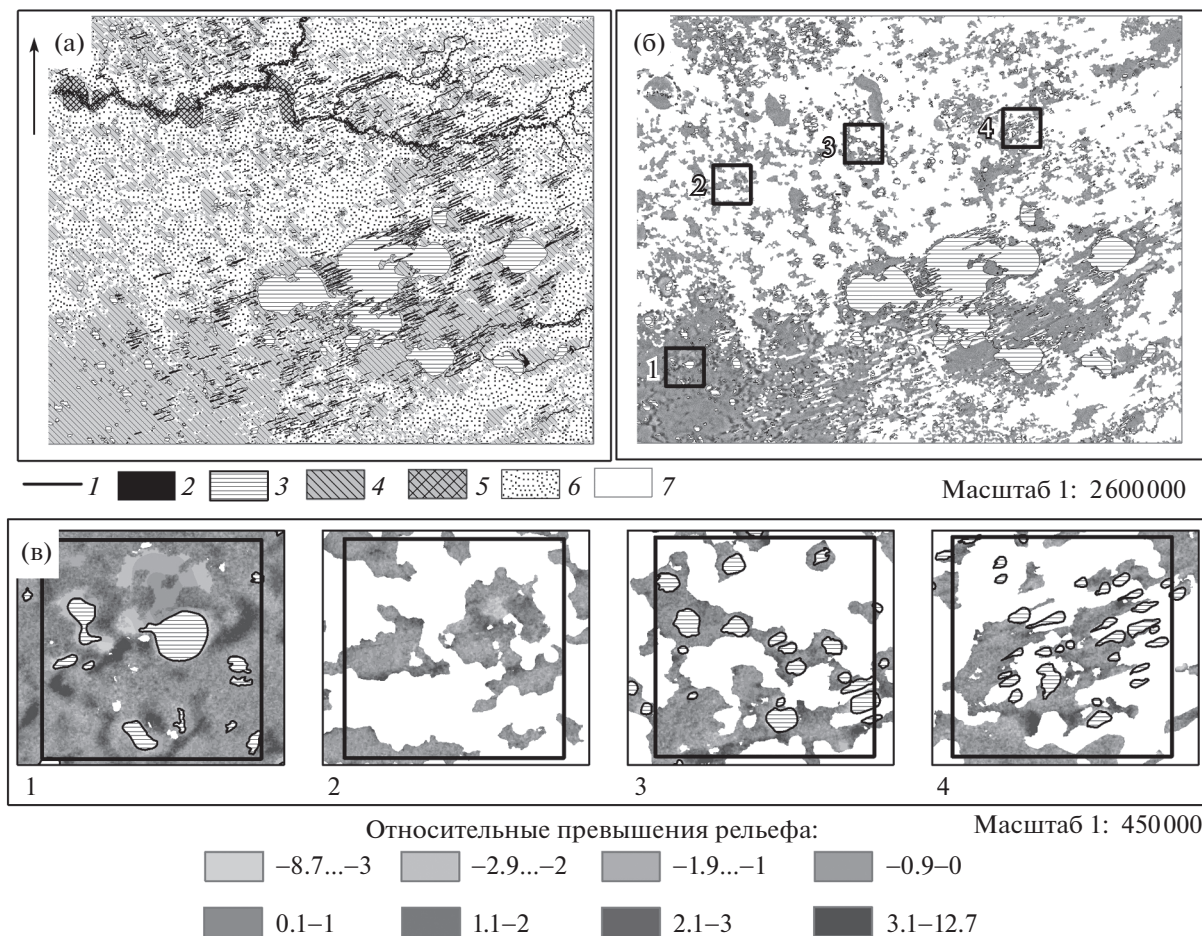


Рис. 1. Результаты геоморфологического картографирования: а – геоморфологическая схема; б – схема авто-гидроморфности; в – увеличенные фрагменты схемы авто-гидроморфности. Условные обозначения: 1 – реки, 2 – гривы, 3 – озера, 4 – палеозера, 5 – аллювиальный комплекс, 6 – полого-волнистая равнина, 7 – автоморфная часть территории.

Поведение древнего человека как индикатор палеоландшафтов. В палеолите и неолите человек занимался охотой, рыбной ловлей и собирательством. Наличие и расположение памятников должно свидетельствовать о благоприятных условиях для этой деятельности. Однако для территории Барабы таких памятников насчитывается немного. В ходе доместикации животных на протяжении эпох бронзы, железа и раннего средневековья последовательно возникали разные виды скотоводства от придомного в начале до полукочевого и кочевого в дальнейшем. Возможность ведения разных типов скотоводства ограничивается некоторыми условиями, в том числе и климатическими. Смена климата сопровождалась сменой типа хозяйствования, что вело к изменениям палеоландшафтных предпочтений человека, а также степени его мобильности [14]. Анализ расположения поселений человека также подтверждает наличие короткопериодических климатических циклов, поскольку объекты одной и

той же культуры могут иметь расположение характерное как для эпох иссушения, так и увлажнения. По тем же причинам часто поселения разной культурной принадлежности располагаются в одних и тех же местах (многослойные памятники). На основе обобщения поведения основных индикаторов иссушения/увлажнения были построены три модели палеобстановок: а) обстановка умеренного увлажнения, близкая к современной и две крайние ситуации: б) максимального иссушения, в) максимального увлажнения [17].

Схема ранжирования территории по степени уязвимости к процессам иссушения/увлажнения. Особое значение при прогнозе изменений обстановок природной среды имеет учет районов, где экосистемы наиболее уязвимы вследствие активизации экзогенных процессов, обусловленных климатическими изменениями. Помимо того, что для территории юга Западной Сибири характерна тенденция к нарастанию аридности климата [6], также увеличивается экстремальность кли-

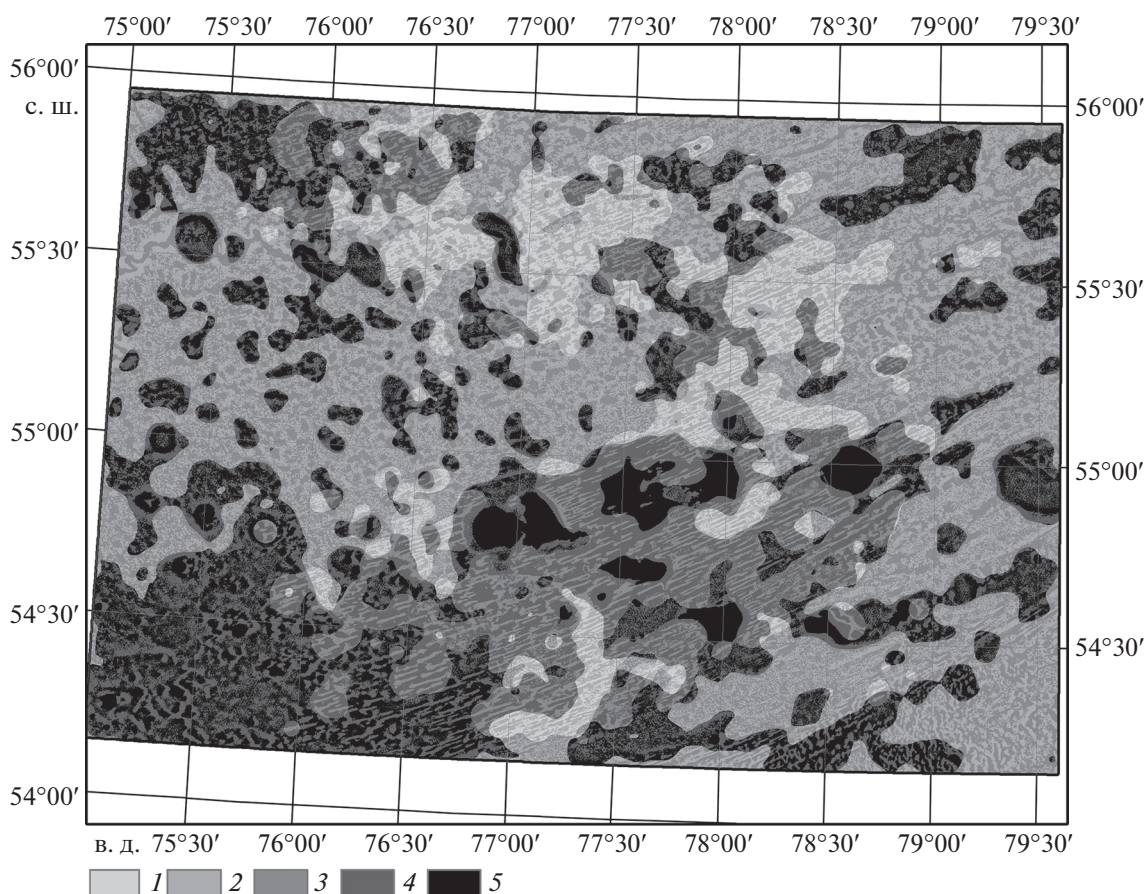


Рис. 2. Схема ранжирования территории по степени уязвимости к процессам увлажнения. Условные обозначения: степень уязвимости: 1 — очень слабая, 2 — слабая, 3 — средняя, 4 — сильная, 5 — очень сильная.

мата, что проявляется в росте частоты возникновения и интенсивности проявлений опасных гидрометеорологических явлений (наводнений, ураганов, засух), в том числе сильных ливней [6]. Ливневые осадки могут стать причиной развития водной эрозии почв, особенно пахотных земель, а ураганы вызывают дефляцию.

Показатель автоморфности/гидроморфности строился для четырех типов рельефа: гравийный, равнинный, гравийно-озерный, озерный, у которых в указанной последовательности уменьшается автоморфность и увеличивается гидроморфность. Таким образом, гравийный рельеф имеет наибольшую автоморфность и самую низкую гидроморфность, а озерный тип рельефа имеет самую высокую гидроморфность и самую низкую автоморфность. Пространственное распределение индикаторных трансформаций различных компонентов природной среды (растительность, почвы, водные объекты) контролируется геологическим каркасом территории (рельеф-субстрат). Поэтому участки с различным типом рельефа и разной автоморфностью/гидроморфностью имеют разную степень уязвимости по

отношению к процессам иссушения/увлажнения.

В гидроморфных ПТК, при условии непрерывного нарастания увлажнения, происходит повышение уровня грунтовых вод с последующим заболачиванием. Конечной стадией данного процесса является затопление всех палеоозерных поверхностей на исследуемой территории. Для автоморфных ПТК возможно лишь повышение уровня грунтовых вод. Нарастание грунтового увлажнения может привести лишь к частичной или полной смене типа растительности: например, степь — луговая степь, или степь — луг, при максимальных уровнях возможно слабое заболачивание автоморфных участков на границе с гидроморфными. В целом же при положительном тренде увлажнения уязвимость автоморфных участков незначительная. Схема ранжирования территории по степени уязвимости к процессам увлажнения представлена на рис. 2.

Усиление аридности климата (иссушение) вызывает дальнейшую деградацию гидроморфных участков, вплоть до полного высыхания современных озер. Так как, подавляющее большин-

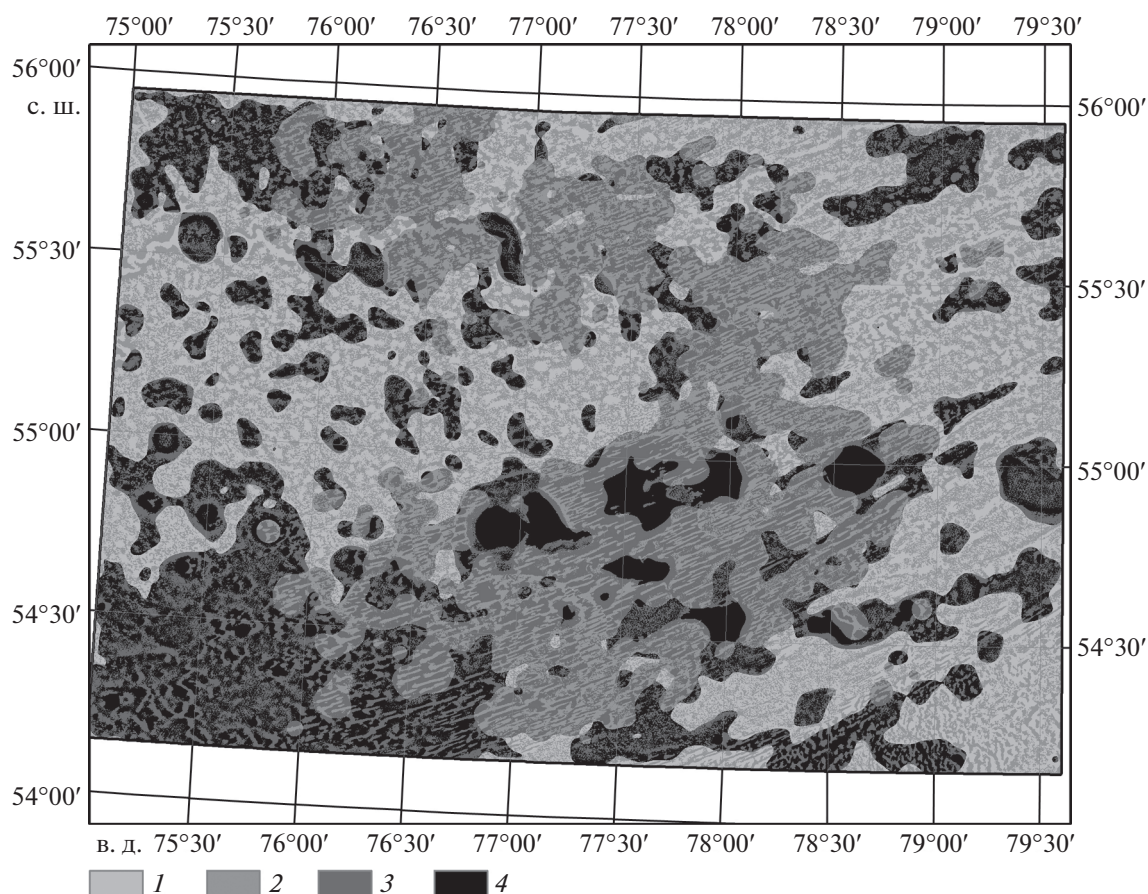


Рис. 3. Схема ранжирования территории по степени уязвимости к процессам аридизации. Условные обозначения: степень уязвимости: 1 — слабая, 2 — средняя, 3 — сильная, 4 — очень сильная.

ство озер содержат засоленные воды и рассолы, в результате их деградации образуются солончаки. Озерные поверхности, вышедшие в субэральную стадию, не закреплены растительностью, поэтому на них будут активно развиваться дефляционные и водно-эрозионные процессы, что происходит в настоящее время [21]. Масштаб проявления этих процессов при нарастании иссушения будет увеличиваться. Автоморфные ландшафты, при увеличении аридности климата, также дестабилизируются. Может происходить 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. Схема ранжирования территории по степени уязвимости к процессам иссушения представлена на рис. 3.

При положительном тренде увлажнения степень уязвимости территорий с различным типом рельефа возрастает в такой последовательности: гривный, равнинный, гривно-озерный, озерный.

В этом случае для гидроморфных участков, степень уязвимости будет на градацию выше, чем для автоморфных. При отрицательном тренде (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 уязвимости, как при отрицательном, так и при положительном тренде увлажнения (см. рис. 3). Территории с озерным рельефом являются наиболее уязвимыми во все эпохи. Во влажные периоды они заполняются водой или заболачиваются, в засушливые — засоляются; на них развиваются эоловые процессы.

Таким образом, гидроморфные участки всех типов рельефа являются уязвимыми при нарастании как увлажнения, так и иссушения. Автоморфные поверхности менее уязвимы при увлажнении и более уязвимы при иссушении. Поэтому тренд иссушения является наиболее опасным для юга Западно-Сибирской равнины.

Заключение. Предложенная методика геоинформационного картографирования позволяет получить прогнозные модели природных обстановок в зависимости от процессов иссушения/увлажнения. Методика базируется на сочетании различной тематической информации (палеогеографической, ландшафтной, археологической, геоботанической) с характеристиками геоморфологического каркаса, полученными по ЦМР на основе SRTM. Комплексный подход и использование индикаторного метода увеличивает надежность и адекватность предлагаемых сценариев. Одним из достоинств методики является возможность визуализировать результаты в виде оценочных карто-схем. Построенные карто-схемы хорошо отражают пространственную гетерогенность трансформационных преобразований экосистем на локальном и региональном уровне и позволяют скорректировать прогнозные модели и палеогеографические реконструкции в зависимости от ландшафтных особенностей территории. Результаты, полученные благодаря предложенной методике, в значительной степени дополняют существующие представления о пространственном распределении трансформаций ландшафтных компонентов при изменении условий увлажнения–иссушения и показывают их дискретно-мозаичный характер, а не субмеридиональное смещение границ природных зон. Новизной этих моделей является возможность оценить степень трансформации наземных экосистем одновременно на всей площади территории и локально по каждому ее участку на среднемасштабном уровне исследования. Это имеет большое практическое значение в связи с усилением аридности и экстремальности климата на юге Сибири.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0330-2016-0018.

Acknowledgments. The study was supported by the State Scientific Research Plan, project no. 0330-2016-0018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Д.И.* Воды Кулундинской степи. Новосибирск: Изд. СО АН СССР, 1960. 214 с.
2. *Архипов С.А., Волкова В.С., Бахарева В.А., Вотих М.Р., Левина Т.П., Кривоногов С.К., Орлова Л.А.* Природно-климатические изменения в Западной Сибири к 2000 г. // *Геология и геофизика*. 1994. Т. 35. № 1. С. 3–21.
3. *Архипов С.А., Волкова В.С.* Геологическая история, ландшафты и климаты плейстоцена Западной Сибири / отв. ред. А.В. Каныгин. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1994. 105 с.
4. *Будыко М.И.* Эволюция биосферы. Л.: Гидрометиздат, 1984. 487 с.
5. *Винокуров Ю.И.* Ландшафтные индикаторы инженерно- и гидрогеологических условий предальтайских равнин. Новосибирск: Наука, 1980. 192 с.
6. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. М.: Росгидромет, 2014. 94 с.
7. *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 природные ресурсы*. 2016. № 1. С. 133–140.
8. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Сер. Кулундинско-Барабинская. Лист N-43-V / под ред. С.Б. Шацкого. М.: Аэрогеология, 1977.
9. *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 природные ресурсы*. 2011. № 2. С. 155–160.
10. *Зольников И.Д., Лямина В.А., Королюк А.Ю.* Комплексная технология картографирования и мониторинга гетерогенного растительного покрова // *География и природные ресурсы*. 2010. № 2. С. 126–131.
11. *Королюк А.Ю.* Проявление динамики экосистем в пространственной структуре растительного покрова на юге Западной Сибири // *Растительный мир Азиатской России*. 2010. № 2(6). С. 12–16.
12. *Кузьмин Я.В., Зольников И.Д., Новикова О.И., Глушкова Н.В., Чупина Д.А., Софеев О.В., Ануфриев Д.Е., Дементьев В.Н.* Анализ пространственного распределения археологических памятников центральной части Барабинской лесостепи (Венгеровский район Новосибирской области) на основе ГИС-технологий // *Вестн. НГУ. Сер. История, филология*. 2013. Т. 12. № 7. С. 87–96.
13. *Левина Т.П., Орлова Л.А.* Климатические ритмы голоцена юга Западной Сибири // *Геология и геофизика*. 1993. № 3. С. 37–50.
14. *Никулина А.В., Зольников И.Д., Кузьмин Я.В., Софеев О.В., Чупина Д.А., Глушкова Н.В., Пчельников Д.В.* Методика использования ГИС-технологий для анализа пространственной локализации поселений на примере эпох бронзы, раннего железного века, средневековья в центральной части Барабинской низменности // *Вестн. Томского ун-та*. 2018. № 428. С. 117–126.
15. *Панади А.Д.* Барабинская низменность (природа, хозяйство и перспективы развития). М.: Гос. изд. географической литературы, 1953. 232 с.
16. *Чупина Д.А., Зольников И.Д.* Геоинформационное картографирование форм и типов рельефа на основе морфометрического анализа // *Геодезия и картография*. 2016. № 6. С. 35–43.
17. *Чупина Д.А., Никулина А.В., Картозия А.А.* Влияние процессов иссушения/увлажнения на ландшафт-

- ные предпочтения человека на территории Барабы в голоцене // Пути эволюционной географии: Материалы Всероссийской науч. конф., посвященной памяти профессора А.А. Величко (Москва, 23–25 ноября 2016 г.). М.: ИГ РАН, 2016. С. 739–744.
18. Шнитников А.В. Внутривековые колебания уровня степных озер Западной Сибири и Северного Казахстана и их зависимость от климата // Труды лаборатории озероведения. М.: Наука, 1950. Т. 1. С. 28–30.
 19. Шнитников А.В. Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария // Зап. Геогр. общества СССР, 1957. Т. 16. 340 с.
 20. Ядринцев Н.М. Уменьшение вод в Арало-Каспийской низменности в пределах Западной Сибири по картографическим исследованиям за 100 лет // Изв. РГО. 1986. Т. 22. № 1. С. 53–62.
 21. Meyer B.C., Schreiner V., Smolentseva E.N., Smolentsev B.A. Indicators of desertification in the Kulunda steppe in the south of Western Siberia // Archives of Agronomy and Soil Science. 2008. V. 54. № 6. С. 585–603.

GIS mapping of the territory by the response to aridization and humidification: a case study of the south of the West Siberian Plain

D. A. Chupina^{1,2,*}, I. D. Zolnikov^{1,2,3}, E. N. Smolentseva², N. N. Lashchinskii⁴,
A. V. Nikulina^{1,2,3}, and A. A. Kartoziya¹

¹ Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³ Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁴ Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁵ Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

*e-mail: chupina_da@igm.nsc.ru

Received February 28, 2017

Accepted May 29, 2018

This paper is concerned with the presentation of the methodology to GIS mapping of the territory according to degree of vulnerability to aridification/humidification processes. The methodology is based on combination of different thematic information, such as paleogeographic, landscape, archaeological, geobotanical, with characteristics of the geomorphological framework built by using of the digital elevation model SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). The area under consideration is located on the Baraba Plain, which has close to the surface position of groundwater. The interrelation between the parameters of landscape and moistening (ground and atmospheric) was considered through the concept of automorphic and hydromorphic lands, on the basis of the indicator of relative elevation derived according to a digital elevation model. Two models of vulnerability of the territory were built by using this indicator for four landscapes (with ridges, lakes, ridges and lakes, and plain) for aridification and humidification cases. The obtained results show areas, which are the most vulnerable to activation of exogenic processes dependent on climatic changes. The study concluded that automorphic surfaces are less vulnerable to humidification and more vulnerable to aridification. At the same time, hydromorphic areas of all types of landscape are vulnerable to both humidification and aridification. Thus, aridification is the most dangerous trend for the south of the West Siberian Plain. The novelty of these models is the ability to assess the degree of transformation of terrestrial ecosystems simultaneously over the entire area and locally for each of its sites at the medium-scale level of research. The proposed methodology allows correcting predictive models and paleo-geographic reconstructions depending on landscape features of the territory.

Keywords: aridification, digital elevation model, SRTM, indicators, the vulnerability of terrestrial ecosystems, hydromorphic and automorphic lands, predictive modeling.

REFERENCES

1. Abramovich D.I. *Vody Kulundinskoi stepi* [Waters of the Kulunda Steppe]. Novosibirsk: SO AN SSSR Publ., 1960. 214 p.
2. Arkhipov S.A., Volkova V.S., Bakhareva V.A., Votakh M.R., Levina T.P., Krivonogov S.K., Orlova L.A. Environmental and climatic changes in Western Siberia by 2000. *Geologiya i Geofizika*, 1994, vol. 35, no. 1, pp. 3–21. (In Russ.).
3. Arkhipov S.A., Volkova V.S. *Geologicheskaya istoriya, landshafty i klimaty pleistotsena Zapadnoi Sibiri* [Geological History, Landscapes and Climate of the Pleistocene of Western Siberia]. Kanygin A.V., Ed. Novosibirsk: NIC OIGGM SO RAN Publ., 1994. 105 p.
4. Budyko M.I. *Evolutsiya biosfery* [The Evolution of the Biosphere]. Leningrad: Gidrometoizdat Publ., 1984. 487 p.
5. Vinokurov Yu.I. *Landshaftnye indikatory inzhenerno-gidrogeologicheskikh uslovii predaltayskikh ravnin* [Landscape Indicators of Engineering and Hydrogeo-

- logical Conditions of the Prealtay Plains]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1980. 192 p.
6. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Tekhnicheskoe rezjume* [The Second Assessment Report on Climatic Change and its Impact on the Russian Federation Territory by Hydromet. Technical Summary]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2014. 94 p.
 7. Glushkova N.V., Chupina D.A., Pchel'nikov D.V., Boldyrev I.I., Selyatitskaya N.A. Mapping and monitoring of aridification processes on the south of the Western Siberian Plain. *Geogr. Prir. Resur.*, 2016, no. 1, pp. 133–140. (In Russ.).
 8. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1: 200 000. Ser. Kulundinsko-Barabinskaya. List N-43-V* [Geological Map of the USSR, Scale 1: 200 000. Series Kulunda–Baraba. Sheet N-43-V]. Shakkii S.B., Ed. Moscow: Aehrogeologiya Publ., 1977.
 9. Zolnikov I.D., Glushkova N.V., Lyamina V.A., Smolentseva E.N., Korolyuk A.Yu., Bezuglova N.N., Zinchenko G.S., Puzanov A.V. Indication of dynamics of environmental complexes of the south of Western Siberia with reference to climatic changes. *Geogr. Prir. Resur.*, 2011, no. 2, pp. 155–160. (In Russ.).
 10. Zolnikov I.D., Lyamina V.A., Korolyuk A.Yu. Complex mapping technology and monitoring of heterogeneous vegetation. *Geogr. Prir. Resur.*, 2010, no. 2, pp. 126–131. (In Russ.).
 11. Korolyuk A.Yu. Relationships between ecosystem dynamics and vegetation structure on the southern part of Western Siberia. *Rastitelnyi Mir Aziatskoi Rossii*, 2010, no. 6, pp. 12–16. (In Russ.).
 12. Kuzmin Y.V., Zolnikov I.D., Novikova O.I., Glushkova N.V., Chupina D.A., Sofeikov O.V., Anufriev D.E., Dement'ev V.N. Analysis spatial distribution of archaeological sites in the central Baraba forest-steppe (vengero-vo country, Novosibirsk province) based on GIS technologies. *Vestn. Novosibirsk. Gos. Univ., Ser.: Istor. Filolog.*, 2013, vol. 12, no. 7, pp. 87–96. (In Russ.).
 13. Levina T.P., Orlova L.A. Holocene Climatic rhythms of the south of Western Siberia. *Geologiya i Geofizika*, 1993, no. 3, pp. 37–50. (In Russ.).
 14. Nikulina A.V., Zolnikov I.D., Kuzmin, Ya.V., Sofeikov O.V., Chupina D.A., Glushkova N.V., Pchel'nikov D.V. Methodology of GIS-based spatial analysis of the Bronze Age, the Early Iron Age, and the Medieval settlements in the central Baraba Lowland. *Tomsk State University Journal*, 2018, no. 428, pp. 117–126 DOI: 10.17223/15617793/428/16 (In Russ.).
 15. Panadiadi A.D. *Barabinskaya nizmennost' (priroda, khozyaistvo i perspektivy razvitiya)* [The Baraba Lowland (Nature, Economy and the Development Prospects)]. Moscow: Gos. Izd. Geogr. Literatury Publ., 1953. 232 p.
 16. Chupina D.A., Zolnikov I.D. GIS-mapping of form and types of relief based on morphometric analysis. *Geodeziya i Kartografiya*, 2016, no. 6, pp. 35–43. (In Russ.).
 17. Chupina D.A., Nikulina A.V., Kartoziya A.A. Influence of aridization humidification processes on landscape preferences of people on the territory of the Baraba during the Holocene. In *Puti evolyutsionnoi geografii: Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati professora A.A. Velichko (Moskva, 23–25 noyabrya 2016 g.)* [Pathsof Evolution Geography: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference, Dedicated to the Memory of Professor A.A. Velichko (Moscow, 23–25 Nov. 2016)]. Moscow: Institut Geografii RAN Publ., 2016, pp. 739–744. (In Russ.).
 18. Shnitnikov A.V. Fluctuations in the steppe lakes of Western Siberia and Northern Kazakhstan, and their dependence on the climate through the ages. In *Trudy laboratorii ozerovedeniya AN SSSR* [Proceedings of the Limnology Laboratory of the Soviet Academy of Sciences]. Moscow: Nauka Publ., 1950, vol. 1, pp. 28–30. (In Russ.).
 19. Shnitnikov A.V. The variability of the total moistening of the continents of the Northern Hemisphere. *Zap. Geogr. Obshchestva SSSR*, 1957, vol. 16, 340 p. (In Russ.).
 20. Yadrintsev N.M. Decrease of waters in the Aral-Caspian lowland within the bounds of Western Siberia based on cartographic research for 100 years. *Izv. Russ. Geogr. Obshchestva*, 1986, vol. 22, no. 1, pp. 53–62. (In Russ.).
 21. 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. Agron. Soil Sci.*, 2008, vol. 54, no. 6, pp. 585–603.