

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИГМ СО РАН)

На правах рукописи

Чупина Дарья Анатольевна



Методика геоинформационного картографирования форм и типов рельефа
в рамках морфогенетического подхода
(на примере районов юга Западной Сибири)

25.00.33 – Картография

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор геолого-минералогических наук, доцент
Зольников Иван Дмитриевич

Новосибирск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА:	
ИСТОРИЯ И СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	11
1.1 История становления геоинформационного картографирования.....	11
1.2 Основные понятия о рельефе с позиций геоморфологии и картографии	20
Выводы по первому разделу	28
2 ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
РЕЛЬЕФА.....	29
2.1 Цифровые модели рельефа	29
2.2 Морфометрические показатели	41
Выводы по второму разделу.....	47
3 ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА:	
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ.....	48
3.1 Дискретный и континуальный подходы к отображению рельефа	48
3.2 Морфогенетический и морфодинамический подходы	
к картографированию рельефа	52
3.3 Численные методы классификации рельефа.....	58
Выводы по третьему разделу	67
4 ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЙОНОВ ЗЕМНОЙ	
ПОВЕРХНОСТИ, УДОВЛЕТВОРЯЮЩИХ УСЛОВИЯМ, ЗАДАЮЩИМСЯ	
ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ.....	69
4.1 Геоинформационное моделирование условий обитания, благоприятных	
для проживания древнего человека в горах Алтая.....	69
4.2 Неотектоническое районирование северо-запада Горного Алтая.....	73
4.3 Картографирование и мониторинг процессов аридизации на юге	
Западно-Сибирской равнины	78
Выводы по четвертому разделу.....	85

5 ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ И МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ РЕЛЬЕФА ПО МОРФОМЕТРИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ.....	86
Выводы по пятому разделу	107
6 ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ТИПОВ РЕЛЬЕФА ПО СООТНОШЕНИЮ ДОМИНИРУЮЩИХ ФОРМ РЕЛЬЕФА В СКОЛЬЗЯЩЕМ ОКНЕ	109
Выводы по шестому разделу	121
7 РЕТРОСПЕКТИВНОЕ И ПРОГНОЗНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ.....	122
7.1 Геоинформационные ретроспективные модели на основе сочетания геологической (палеогеографической) и археологической информации с данными по геолого-геоморфологическому каркасу	123
7.2 Геоинформационные прогнозные модели на основе ранжирования территории по степени уязвимости к экзогенным процессам в зависимости от динамики климата	134
Выводы по седьмому разделу	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	145
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА МЕТОДИКИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ В РАМКАХ МОРФОГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) СПЕЦИАЛЬНАЯ КАРТА РАНЖИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ БАРАБИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ ПО СТЕПЕНИ УЯЗВИМОСТИ ПРИ АКТИВИЗАЦИИ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ АРИДИЗАЦИЕЙ КЛИМАТА	165

ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) СПЕЦИАЛЬНАЯ КАРТА РАНЖИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ БАРАБИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ ПО СТЕПЕНИ УЯЗВИМОСТИ ПРИ АКТИВИЗАЦИИ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ГУМИДИЗАЦИЕЙ КЛИМАТА	166
--	-----

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Характерной чертой современного этапа развития картографии является усиление ее геоинформационной составляющей как в теоретическом, так и в практическом аспектах. В настоящее время для картографирования рельефа широко используется различный инструментарий геоинформационных систем (ГИС), что снижает трудоемкость и субъективность исследований. Кроме того, применение ГИС-обработки цифровых моделей рельефа (ЦМР) позволяет более полно описывать геоморфологические объекты на количественном уровне, а также картографировать их. В геоморфологическом картографировании наиболее актуальными являются морфодинамический и морфогенетический подходы. Однако, если сравнивать эти два подхода, то морфодинамический является более детально разработанным, в большей степени формализованно-объективизированным и автоматизированным. Геоморфометрическое картографирование в рамках морфогенетического подхода пока апробировано на частных примерах с выделением отдельных типов и форм рельефа. При этом отмечается ряд затруднений, связанных с различного рода неопределенностями при морфологических и генетических характеристиках. Таким образом, на современном уровне исследований очевидна необходимость в разработке методики геоинформационного картографирования в рамках морфогенетического подхода на основе морфометрического анализа цифровых моделей рельефа.

Степень разработанности темы. Вопросами разработки методов и средств геоинформационного картографирования и моделирования рельефа занимается ряд отечественных научных организаций: Иркутский национальный исследовательский технический университет, Кубанский государственный университет, Казанский федеральный университет, Московский государственный университет. Значительный вклад в развитие методов морфометрического анализа внесли советские и российские ученые: Ефремов Ю. К., Спиридонов А. И., Волков Н. М., Девдариани А. С., Философов В. П., Симонова Ю. Г., Фролов Ю. С., Червя-

ков В. А., Ласточкин А. Н., Ступин В. П., Флоринский И. С., Шарый П. А., Николаева О. Н. и др. Среди работ зарубежных исследователей стоит особо отметить наибольшее влияние теоретических и практических разработок, принадлежащих Evans I. S., Krcho J., Pike R. J., MacMillan R. A.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационного исследования состоит в разработке на основе морфогенетического принципа комплекса методик геоинформационного картографирования форм и типов рельефа и апробации разработанных методик на примере некоторых районов юга Западной Сибири.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

- проанализировать историю и состояние вопроса в области геоинформационного картографирования рельефа;
- выявить методико-технологические возможности картографирования рельефа в зависимости от полноты знаний о морфометрических и историко-генетических характеристиках;
- разработать методику геоинформационного картографирования типов рельефа по пользовательским критериям и на основе распознавания образов;
- разработать методику геоинформационного картографирования гомогенных и гетерогенных типов рельефа;
- апробировать технологии ретроспективного и прогнозного моделирования на основе использования полученных геоинформационных карт.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является геоинформационное картографирование рельефа.

Предметом исследования является методика геоинформационного картографирования форм и типов рельефа на морфогенетическом принципе.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- разработана методика геоинформационного картографирования в рамках морфогенетического подхода на основе морфометрического анализа цифровых моделей рельефа с учетом степени определенности геоморфометрических и генетических данных.

- составлены специальные карты ранжирования территории Барабинской равнины по степени уязвимости при активизации экзогенных процессов, обусловленных изменениями климата;
- составлены специальные карты обстановок природной среды в голоцене для юга Западно-Сибирской равнины;
- построены геоинформационные модели благоприятных обстановок проживания древнего человека палеолита для Горного Алтая и древних людей, относящихся к разным культурам второй половины голоцена (бронзовый, ранний железный век, средневековье) для Барабинской низменности.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость исследований заключается в том, что разработанные методики геоинформационного картографирования форм и типов рельефа могут найти применение при создании государственных геологических карт Российской Федерации (РФ) новых серий, при картографировании геолого-геоморфологической основы ландшафтов для рационального природопользования, а также для построения прогнозных моделей.

Практическая значимость работы состоит в том, что результаты научных разработок по заявленной тематике могут быть практически применены в различных областях хозяйственной деятельности и организации почвенных, ботанических, геологических съемок и проведении изысканий. Апробация разработанных методик показала возможность их успешного применения при палеогеографических реконструкциях и при прогнозном моделировании интенсивности проявления экзогенных процессов.

Методология и методы исследований. В качестве методологической базы исследования использованы следующие методы: визуальное дешифрирование, морфометрический анализ, статистический анализ, метод управляемых классификаций, индикаторный метод, метод аналогий, методы районирования, методы пространственного ГИС-анализа. Эмпирической основой исследований служили цифровая модель рельефа открытого доступа SRTM, базы геоданных лаборатории

№ 284 ИГМ СО РАН, космические снимки LANDSAT и MODIS, карты четвертичных отложений масштаба 1 : 200 000 (геолфонд ИГМ СО РАН). Обработка данных осуществлялась в программных пакетах ArcGIS 10.2.2 компании ESRI и в системе обработки цифровых изображений ENVI 5.2, разработанной компанией ITT Visual Information Solutions.

Положения, выносимые на защиту:

- в рамках морфогенетического подхода информационная полнота данных о рельефе предопределяет конечные единицы его дискретизации: 1) районы, ареалы, зоны; 2) однородные типы рельефа; 3) гетерогенные типы рельефа; 4) модели геосистем;
- типы рельефа, не подразделяющиеся на отдельные формы, эффективно распознаются по морфометрическим характеристикам с использованием управляемых классификаций;
- типы рельефа с определенной внутренней территориальной организацией распознаются на основе удельного соотношения доминирующих форм с использованием метода скользящего окна.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует областям исследования: 9 – Геоинформационное картографирование и компьютерные технологии; 12 – Использование карт в науке и практике, картометрия, математико-картографическое моделирование, точность и надежность исследований по картам паспорта научной специальности 25.00.33 – Картография, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты выполненных исследований представлены на 17 и 23 Международных конференциях «ИнтерКарто/ИнтерГИС» (14–19 декабря 2011 г., г. Белокуриха; 26–28 июня 2017 г., г. Южно-Сахалинск); VIII и IX Международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012» (10–20 апреля 2012 г., Новосибирск), «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013» (15–26 апреля 2018 г., Новосибирск); 6 Международной конференции молодых ученых «The 6th International Siberian Early Career GeoScien-

tists Conference» (9–23 июня 2012 г., г. Новосибирск); 10, 11, 14, 15 Всероссийских открытых ежегодных конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (12–16 ноября 2012 г.; 11–15 ноября 2013 г.; 14–19 ноября 2016 г.; 13–17 ноября 2017 г.; г. Москва); VIII и X Всероссийских совещаниях по изучению четвертичного периода «Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований» (10–15 июня 2013 г., г. Ростов-на-Дону; 25–29 сентября 2017 г., г. Москва); VI конференции «Геоинформационные технологии и космический мониторинг» в рамках объединенной международной конференции «Экология. Экономика. Информатика» (8–13 сентября 2013 г., г. Ростов-на-Дону); XXXIII Пленуме Геоморфологической комиссии РАН (17–20 сентября 2013 г., г. Саратов); Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора Величко А. А. «Пути эволюционной географии» (23–25 ноября 2016 г., г. Москва).

Защищаемая методика была использована в ходе работы над проектом РФФИ №16-35-00409 мол_а «Геоинформационное моделирование геолого-геоморфологического каркаса ПТК для выявления участков пониженной устойчивости биотических элементов к региональным климатическим изменениям (на примере Обь-Иртышского междуречья)». Методические наработки автора используются в учебном курсе «Методы геоинформационных систем (ГИС) и дистанционного зондирования (ДЗ) в геологии» на геолого-геофизическом факультете Новосибирского государственного университета. Сам диссертант ведет практические занятия по «Введению в ГИС» и по «Геоинформационному сопровождению учебной практики по структурной геологии и геологическому картированию (полигон ГГФ, Ши́ра, Хакасия)».

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертационного исследования представлены в девяти научных работах, из них две статьи в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук; три статьи – в журналах, входящих

в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus; одна статья – в журнале, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Web of Science.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 166 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, семи разделов, заключения, списка литературы, включающего 162 наименования, содержит 5 таблиц, 65 рисунков и 3 приложения.

1 ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА: ИСТОРИЯ И СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 История становления геоинформационного картографирования

На протяжении столетий шло накопление знаний о поверхности Земли, о государствах и народах как в текстовых, так и в иллюстрационных материалах. Считается, что картография зародилась в древности, когда первобытные географические изображения стали использоваться для самостоятельной передачи информации. За это время менялись картосоставительские методы и технологии издания карт: от рисования (на камне, дереве, папирусе, ткани) к составлению рукописных карт на бумаге, затем гравированию карт (на камне, металле) и внедрению картопечатания с последующим применением фотохимических и фотокопировальных процессов и составлению карт в компьютерных сетях, вплоть до мультимедийных атласов к настоящему времени. Параллельно изменялось назначение и использование карт. Вначале они применялись для ориентирования и передвижения на местности, т. е. для навигации, однако с развитием наук карты приобрели функции средств накопления и обобщения знаний, а также инструментов моделирования и познания окружающего мира.

В соответствии с определением, принятым Международной картографической ассоциацией «картография – наука о картах как особом способе изображения действительности, их создании и использовании» [6, с. 21]. Само же определение карты следующее: «карта – уменьшенное, обобщенное изображение поверхности Земли, других небесных тел или небесной сферы, построенное по математическому закону на плоскости и показывающее посредством условных знаков размещение и свойства объектов, связанных с этими поверхностями» [6, с. 5].

Традиционно на картах выделяются следующие элементы: картографическое изображение, легенда (система использованных условных обозначений и текстовое описание к ним), математическая основа, дополнительные данные

(не являются обязательными). *Картографическое изображение* представляет собой основной элемент карты. Изображение формируется на основе использования системы *условных знаков*, позволяющих ассоциативно подойти к пониманию сущности картографируемого явления или объекта, а их текстовое описание содержится в легенде [97]. Пользователь, читая карту, воспринимает два типа информации: формальную (первичную) и скрытую (вторичную). К первому типу относятся непосредственное название и характеристика картографических условных знаков, изображающих реальный географический объект или явление. Ко второму – информация, получаемая методом анализа картографического изображения: сочетание и пространственное взаимодействие знаков разных графических переменных (изолинии, значки, фон и др.) образуют неисчерпаемое множество картографических образов [4]. При этом одни и те же условные обозначения могут давать различные картографические образы, и напротив, разные обозначения способны формировать у читателя идентичные образы. В этом есть некоторый субъективизм картографической информации – люди, пользуясь одними и теми же картами, извлекают из них разную информацию [5].

Уменьшение физического объекта, отображенного на карте, характеризуется *масштабом*, т. е. отношением отрезков между идентичными точками карты и отображаемого пространства. Разная степень уменьшения достигается применением карт масштабного ряда. Однако при уменьшении необходимо сохранить читаемость картографического изображения, для чего выполняется *генерализация*, т. е. отбор и обобщение изображаемых на карте объектов соответственно ее назначению, масштабу, содержанию и особенностям картографируемой территории [6, с. 128]. Обычно в картографической генерализации выделяются два вида: генерализация содержания и генерализация изображения.

В картографии к концу XX в. сформировалось три основные концепции: 1) познавательная и модельно-познавательная; 2) коммуникативная; 3) картоязыковая. Эти концепции содержат разные взгляды на предмет картографии и ее ме-

тоды. Благодаря трудам Салищева К. А. и Баранского Н. Н., картография стала рассматриваться как познавательная наука [80, 2]. В статьях Салищева К. А. и Гедымина А. В. были четко сформулированы идеи картографического метода исследования в качестве действенного средства познания окружающего мира [81, 15]. Таким образом, зародилась познавательная концепция картографии. В работах Салищева К. А. введено определение карты как «образно-знаковой модели, предназначенной для отображения и исследования пространственного размещения, сочетаний и взаимосвязей явлений природы и общества (и их изменений во времени)» [83, с. 30].

Интеграция картографии со смежными науками, такими как теория информации, дала толчок для возникновения другой концепции – коммуникационной. Ее основоположниками можно считать Бочарова М. К., Робинсона А., Петченека Б. [8, 46]. На стыке картографии и семиотики возникла языковая концепция. Ее истоки заложены в трудах как отечественных, так и западных картографов: Лютого А. А., Ратайского Л., Правды Я., Бертэна Ж., Асланикашвили А. Ф., Списа Э. [73, 59].

Технический прогресс в конце XX в. способствовал интеграции основных теоретических концепций. Главную роль в этом сыграли геоинформационные системы, сочетающие в себе функции моделирования и принятия решений (т. е. познания, анализа и управления) с функциями отображения и передачи пространственно-временной информации (т. е. коммуникации). Таким образом, происходит становление геоинформационной концепции картографии, в которой карта рассматривается как модель действительности, обладающая уникальными гносеологическими свойствами, а с другой – как средство аккумуляции, преобразования и передачи информации [4]. Общее представление обо всех четырех концепциях обобщено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные концепции картографии

Кон- цепции	Модельно- познавательная	Коммуникативная	Картоязыковая	Геоинформационная
Карта	Модель действительности	Канал информации и средство коммуникации	Особый текст, составленный с помощью условных знаков (языка карты)	Образно-знаковая геоинформационная модель действительности
Картография	Наука о познании действительности посредством картографического моделирования	Наука о передаче информации	Наука о языке	Наука о системном информационно-картографическом моделировании и познании геосистем
Основные направления исследований	Системный подход в картографии, картографическое моделирование, использование карт, развитие теории географической картографии	Совершенствование методик отображения картографической информации для улучшения ее восприятия, теория автоматизации	Развитие картографической семиотики, автоматизация конструирования картографических текстов	Разработка теории геоинформационного картографирования, картографического моделирования, картографических знаковых систем, проблем распознавания образов
Генерализация	Целенаправленный отбор и обобщение картографических объектов способствует более отчетливому проявлению основных элементов и связей, получению качественно новой информации	Целенаправленный отбор и обобщение картографических объектов приводит к неизбежным потерям информации		В среде ГИС генерализация изображения происходит автоматизированно, а также развивается мультимасштабное картографирование, в котором одна карта покрывает целое множество масштабов с разным уровнем генерализации
Смежные области	География и другие науки о Земле и обществе, технические науки, теория и методология познания	Информатика, автоматика, теория восприятия, кибернетика, семиотика	Семиотика, лингвистика, теория информации, компьютерная графика	Геоинформатика, дистанционное зондирование, теория баз данных и система управления базами данных (СУБД), компьютерная графика, науки о Земле и обществе и др.
Представители	Тилло А. А., Анучин Д. Н., Баранский Н. Н., Салищев К. А., Гедымин А. В., Исаченко А. Г.	Арнбергер Е., Колачный А., Робинсон А., Бочарова М. К., Петченека Б. и др.	Асланикашвили А. Ф., Лютый А. А., Правда Я., Ратайский Л., Бертэн Ж., Списс. Э.	Берлянт А. М., Тикуннов В. С., Кошкарев А. В., Сераспинас Б. Б., Бешенцев А. Н., Лисицкий Д. В., Лурье И. К. и др.

Традиционный подход к картам подразумевал, что сама карта является конечным продуктом. Без возможности внесения изменений или перегруппировки данных такой продукт сильно ограничивает пользователя. Геоинформационное картографирование (ГК), поддерживая хранение исходных данных на компьютерных носителях, обеспечивает такие возможности, отображая и визуализируя информационные выборки исходя из нужд пользователя. Таким образом, компьютеризация привела к тому, что карта, не теряя своих традиционных функций, стала представлять собой базу данных, управляемую пользователем. Берлянт А. М. описал пять этапов изменений, происходящих с картой, по мере становления геоинформационного картографирования [3].

1 Внедрение автоматизации в картографию было направлено на снижение трудоемкости картосоставления. Применение автоматических графопостроителей и алфавитно-цифровых печатающих устройств (АЦПУ). Качество карт заметно уступало качеству карт, составленных традиционным способом.

2 Имитация ручных процессов картосоставления с использованием компьютеров, улучшение качества карт и атласов.

3 Максимальное использование компьютерными технологиями традиционных методик проектирования и составления карт, в том числе метода географической локализации, основных правил генерализации, приемов взаимного согласования картографических объектов.

4 Внедрение дополнительных возможностей компьютерной графики и дизайна (электронного цветоделения, более высокой цветопередачи, издательских систем подготовки макета карт). Повышение качества и геометрической точности картографических произведений.

5 Создание карт как традиционного вида и качества, так и геоинформационных карт и моделей, отличающихся от них.

Становлению и развитию ГК способствовало усовершенствование технических средств, создание программных пакетов ГИС, разработка баз данных, развитие теории и методов геоинформатики, широкое внедрение и практическое при-

менение в науках о Земле ГИС-технологий [58]. Таким образом, ГК возникло и развивается как прямое продолжение системного картографирования в новой среде компьютерных технологий. Несмотря на то, что карта по-прежнему дает информацию о месторасположении объекта, его качественных характеристиках (тип, вид, класс) и топологических взаимоотношениях с другими объектами, основное целевое назначение карт (до 80 %), составляемых с помощью ГИС, стало носить оценочный или прогнозный характер либо отражать то или иное тематическое районирование территории [26].

По Берлянту А. М. [6, с. 269], «геоинформационное картографирование – это автоматизированное создание и использование карт на основе ГИС и баз картографических данных и знаний. Суть геоинформационного картографирования составляет информационно-картографическое моделирование геосистем». В таком программно-управляемом картографировании по-новому происходит выбор математической основы и компоновки карт («перепроецирование на лету», свободное масштабирование, отсутствие фиксированной нарезки листов), а проблемы генерализации могут решаться с использованием фильтрации, сглаживания и т. п. [26].

Широкое применение геоинформационного картографирования в научных исследованиях обусловлено возможностью: 1) комплексного анализа большого количества параметров, в том числе разнородной тематической информации; 2) пространственного анализа информации и сведения полученных данных в единую систему; 3) обеспечения прогноза изменения компонентов природной среды в пространстве и времени в связи с изменением природных условий [32]. При разработке концептуальных основ геоинформационного картографирования отмечены следующие его особенности [77]:

- высокая степень автоматизации, опора на базы цифровых картографических данных и базы географических (геологических, экологических и др.) знаний;
- системный подход к отображению и анализу геосистем;

- интерактивность картографирования, тесное сочетание методов создания и использования карт;
- оперативность, приближающаяся к реальному времени, в том числе с широким использованием данных дистанционного зондирования;
- многовариантность, допускающая разностороннюю оценку ситуаций и спектр альтернативных решений;
- многосредность (мультимедийность), позволяющая сочетать иконические, текстовые, звуковые отображения;
- применение компьютерного дизайна и новых графических изобразительных средств;
- создание изображений новых видов и типов (электронные карты, трехмерные модели и анимации и др.);
- преимущественно проблемно-практическая ориентация картографирования, нацеленная на обеспечение принятия решений.

Однако некоторые представители классических школ картографии обеспокоены изменениями, происходящими в ходе развития технологий картографирования. Так, например, Верещака Т. В. подчеркивает: «Возможно, кто-то скажет, что карту можно сделать не выходя из дома. Действительно, сегодня создатели карт располагают материалами съемок с самолетов, космических съемок, спутниковых наблюдений и высокими компьютерными технологиями их обработки, включая рисовку рельефа и окончательное составление карт. Однако от аэрофотоснимков и космических изображений до карты лежит еще большой путь, базовая часть которого проходит через полевые работы» [12, с. 38]. Не умаляя заслуг геоинформационной картографии (среди которых снижение трудоемкости картосоставления и возможностей оперативного картографирования, развитие тематической картографии статистического вида), такие исследователи считают важным, чтобы все достижения традиционной картографии были не только использованы, но и развиты с учетом новых возможностей. Так, например, для «географизации» автоматического создания карт Сваткова Т. Г. считает необходимым «обобщить

и систематизировать достижения географической картографии именно в части составительских работ – при создании общегеографических и тематических карт. Объединение накопленных при традиционном методе составления карт опыта и знаний с инженерно-математическими приемами ведет к реальному прогрессу в картографии» [85, с. 15].

В связи с этим стоит отметить, что ГК адаптировало и вобрало в себя все разработанные методики комплексных географических исследований: методы географического моделирования геосистем и их компонентов (в том числе моделирование структуры, динамики, взаимосвязей, функционирования геосистем в пространстве и времени); методы районирования; принципы географической интерполяции и экстраполяции; приемы ключевых исследований; принципы комплексирования и оптимизации (увязка между собой набора источников информации и приемов их анализа); методы географической индикации (суждение о явлениях, скрытых от непосредственного наблюдения, по совокупности характерных внешних признаков) [77]. При этом для ГИС-технологий геоинформация – не только продукт, но и исходное сырье.

Тематическое картографирование развивалось в нашей стране благодаря комплексному анализу, введенному в картографию Салищевым К. А. Оно было и остается на сегодняшний день главным методом системного географического изучения природных условий и ресурсов территории Российской Федерации» [45]. Перспективы развития тематической картографии в настоящее время напрямую связаны с геоинформационными и мультимедийными технологиями, с трансформированием традиционных карт и атласов в электронные атласы-энциклопедии, где наряду с картами и текстами к ним важное место отводится аудиовизуальной информации [98].

Помимо всего прочего, только развитие геоинформационных технологий сделало возможным появление *оперативного* и *динамического картографирования*. Оперативное ГК обеспечивает обработку поступающей информации и ее картографическую визуализацию практически в режиме реального времени.

Источниками данных могут служить материалы аэрокосмических съемок, статистические данные, результаты социологических исследований, кадастровая информация и т. п. Цель такого картографирования – своевременное информирование граждан, например, о половодье и зонах затопления территорий, результатах голосования на выборах и т. д. Оперативные карты предназначены для решения широкого спектра задач: от чрезвычайных ситуаций до политических и социальных событий.

Динамическое ГК существенно расширило возможности отображения динамики объектов и явлений благодаря использованию анимации – динамической последовательности карт (кадров, сцен), создающей при демонстрации эффект движения (мультипликации). Анимация в картографии стала развитием традиционных карт динамики, на которых фиксировались состояния объектов в разные моменты времени. Картографическая анимация позволяет показать изменения и скорости протекания процессов в геосистемах, а значит, служит наиболее эффективным средством визуализации результатов мониторинга [55]. В настоящее время анимации могут быть применимы не только к картам, но также к элементам интерфейса картографических приложений [105].

Помимо эффектов анимации, современные возможности геоинформационного картографирования позволяют задействовать весь арсенал мультимедиа технологий. В настоящее время динамическое ГК можно считать частным случаем крупного направления мультимедийной картографии, краткое определение которого по Лисицкому Д. В.: «мультимедийная картография – это сочетание разнообразных методов картографии и мультимедиа с помощью перекрестных гиперссылок между разными файлами на основе индивидуального поиска и/или выбора информации самими пользователями в рамках картографического произведения» [96, с. 33]. Важнейшим достоинством мультимедийной картографии является решение проблемы загруженности и читаемости карты за счет дополнения ее другими формами представления данных (видео, звук, анимация, ссылки к Интернет-ресурсам). Это значительно повышает информативность картографического изо-

бражения. Примером могут служить научно-исследовательские работы под руководством доктора технических наук Лисицкого Д. В. и доктора исторических наук Колоткина М. Н. по теме: «Создание серии исторических карт на территории Новосибирской области с применением мультимедийных методов» для электронного атласа «Люби и знай свой край родной» [117].

Как отмечает ряд авторов [26, 31], вырос спрос на тематические карты среди широких кругов населения, не всегда владеющих картографическими знаниями, но активно использующих разнообразные геоданные в своей деятельности. Очевидно, что для таких геоинформационных ресурсов возрастает значение формализации и «объективизации». Внедрение формальных процедур в создание геоинформационных ресурсов для потребителя позволяет автоматизировать выполнение наиболее рутинных и трудоемких работ, благодаря чему можно более творчески подойти к самому процессу моделирования и оформления его результатов.

1.2 Основные понятия о рельефе с позиций геоморфологии и картографии

Картографирование рельефа востребовано разными отраслями науки: геоморфология, геология, геофизика, гидрология, метеорология и климатология, ландшафтоведение, почвоведение. Наиболее тесно в этом вопросе пересекаются интересы картографии и геоморфологии. Геоморфологи обычно подразумевают под рельефом «совокупность форм земной поверхности, различных по очертаниям, размерам, происхождению, возрасту и истории развития. Он складывается из положительных форм, образующих возвышения рельефа и отрицательных, представляющих собой впадины» [20, с. 237]. Выделяют шесть таксономических рангов рельефа: планетарный рельеф (материки и ложе океанов), мегаформы (горные системы, равнинные страны и др.), макроформы (горные хребты, межгорные впадины), мезоформы (холмы, долинно-балочная сеть), микроформы (суффозионные блюдца, промоины), наноформы (кочки).

Рельеф земной поверхности формируется в результате воздействия на земную поверхность эндогенных и экзогенных процессов [30]. Эндогенные факторы

проявляются в тектонических движениях земной коры и сопровождаются образованием разломов, перемещением блоков, складчатостью и магматизмом. Экзогенные факторы делятся на три группы процессов: выветривания, сноса и накопления. На интенсивность проявления экзогенных процессов существенно влияет климатический фактор. При этом на преобладание тех или иных процессов указывают размеры форм рельефа. Если рассматривать рельеф как совокупность морфоструктурных и морфоскульптурных элементов [21], то:

- морфоструктуры формируются под преобладающим действием тектоники и представлены преимущественно крупными формами (мега- и макро-);
- морфоскульптуры образуются под воздействием экзогенных процессов и занимают мезо- и микроуровень иерархического ряда.

Совместное действие эндогенных и экзогенных факторов формирует типы рельефа. Согласно Щукину И. С., тип рельефа – это сочетание определенных, закономерно повторяющихся форм, развившихся на определенной геологической структуре, под воздействием одного и того же комплекса рельефообразующих факторов [116].

Многочисленные споры в геоморфологии связаны с методическими принципами построения геоморфологических карт. В соответствии с точкой зрения Маркова К. К., на карте должны быть изображены формы, генезис и возраст рельефа [60]. Он полагал, что для показа форм лучше всего сохранять горизонтали, дополняя их гашюрами и особыми значками. Однако, при изображении рельефа горизонталями, морфологическая карта будет идентична топографической. Некоторые полагают, что для картирования форм необходимо расчленить рельеф на составные части: грани, ребра, точки [35]. Карта, составленная таким образом, является аналитической [89] или граневой [57]. Другие считают, что важно выявить естественные границы делимости рельефа, в качестве которых выступают структурные линии и характерные точки [53]. Эти элементы, отражаясь на карте морфодинамического анализа рельефа, делят территорию на элементарные поверхности. Главное назначение морфологической карты состоит в обеспечении точной

фиксации и полной характеристики точечных, линейных и площадных элементов земной поверхности. В геологической практике в основном востребовано отображение генезиса и возраста рельефа. Поэтому эти карты не могут быть аналитическими, а являются хроногенетическими (цветом – генезис) или генетико-возрастными (цветом – генезис, светлостью/темнотой – возраст).

Существует много точек зрения по поводу акцентирования того или иного компонента геоморфологической триады (форма, генезис, возраст) на картах. Можно выделить три основные парадигмы: описательно-морфологическую, историко-генетическую, морфодинамическую.

Описательно-морфологическая парадигма. На начальных этапах (в XVIII – начале XIX в.) геоморфология развивалась в русле морфологически-описательной парадигмы, стремясь к описанию внешних особенностей форм земной поверхности, сопоставляя/разделяя формы рельефа лишь по качественным признакам. При этом вопросы генетической интерпретации оставались на втором плане. Кризис данной парадигмы был вызван тем, что классификации рельефа зачастую носили частный характер на основе быденного языка (хребты, низины, долины и т. д.). Пластика и морфология рельефа учитывались по отдельным его свойствам или по некоторым их сочетаниям. Наиболее однозначно рельеф разделялся на равнинный и горный и менее определенно далее, например, на увалистые, волнистые, холмистые равнины. Из-за образности их описания каждый исследователь за одним и тем же названием представлял разную их натурную реализацию. За это время накоплен обширный материал и была собрана необходимая информация для возникновения историко-генетической концепции в геоморфологии.

Историко-генетическая парадигма. К концу XIX в. в геоморфологии сложилось два направления: географическое и геологическое, связанное с геологической съемкой. Оба направления стремились к созданию классификаций форм рельефа и объяснению его происхождения. Идеи изменчивости форм земной поверхности во времени и пространстве, закономерного развития их в зависимости от того или иного сочетания эндогенных и экзогенных факторов придали интерес

геоморфологическим исследованиям. А. Пенк и В. Девис показали, что морфологический анализ является одним из эффективных методов для восстановления прошлой истории тех или иных участков земной коры [69].

По Уфимцеву Г. Ф. подход к изучению рельефа представляется в виде последовательности: 1) земная поверхность (общие понятия для наук о Земле); 2) рельеф земной поверхности и коррелятные ему отложения (основной и дополнительный объекты геоморфологии); 3) морфология рельефа; 4) элементарные формы рельефа; 5) структура рельефа как пространственное временное многообразие; 6) генезис рельефа как обобщенная характеристика его состояния; 7) возраст рельефа как длительность его существования, выводимая из анализа коррелятных отложений [101].

Нужды геологической съемки и поиска полезных ископаемых обусловили повышенный спрос на развитие историко-генетического направления в исследованиях рельефа. Морфология, в соответствии с данным подходом, выступает как результат деятельности определенного процесса в конкретное время: пока не проявится процесс – форма не существует. Таким образом, морфология рельефа вторична по отношению к процессу и времени. По мнению Селиверстова Ю. П., рельеф – это «комплекс форм, отражающих специфические черты субстрата конкретного происхождения и в определенное время» [86, с. 12], а с точки зрения Тимофеева Д. А. чисто морфологические классификации играют «вспомогательную роль в общих типизациях рельефа земной поверхности» [100]. Следовательно, в рамках историко-генетической концепции роль морфологического анализа ограничивается выделением индикаторов, которые эффективны для историко-генетической диагностики форм и типов рельефа.

Оппоненты данного подхода вполне справедливо указывают на то, что далеко не всегда однотипность форм рельефа свидетельствует о сходстве происхождения, что связано с процессами дивергенции и конвергенции. Еще более сложной является проблема возрастной диагностики, так как геологические методы применимы лишь для аккумулятивных форм рельефа и не могут быть использо-

ваны непосредственно для определения возраста выработанного (денудационного) рельефа. Кроме того, рельефообразующие процессы нередко протекают одновременно, и не всегда легко разрешим вопрос, какой из них в наибольшей степени определяет генезис рельефа. Подобные высказывания ставят под сомнение достоверность генетической диагностики и соответственно адекватность морфогенетических карт.

Морфодинамическая парадигма. Альтернативная модель геоморфологического картографирования предложена Ласточкиным А. Н. По его мнению, рельеф следует описывать и исследовать на количественной основе вне наших субъективных представлений о его генезисе и возрасте. Для этого может быть использован структурный анализ, который должен основываться на учении о симметрии и учитывать такие характеристики, как анизотропия, сложность и др. Сторонники этой идеи считают, что достижения математических методов и компьютерных технологий при морфологическом описании и анализе земной поверхности позволяют им утверждать, что в настоящее время происходит смена историко-генетической парадигмы на морфодинамическую. Эта парадигма определяется следующим образом: морфология изучаемых объектов отражает создавшие и преобразовавшие ее процессы, имевшие место в прошлом, и определяет происходящие ныне и ожидаемые в обозримом будущем потоки и переносимые вещество и энергию [53].

Ласточкин А. Н. предлагает принять мерономический универсальный ряд частей земной поверхности (ЗП) любого размера, составленный в порядке их усложнения: элементы ЗП (точечные, линейные, площадные) – формы ЗП – комплексы (типы) форм. Ласточкин сравнивает такой подход с биологическим устройством организмов: молекулы-клетки-органы. Но от биологической мерономии иерархия геоморфологических образований отличается своими повторами (референсами) по мере уменьшения детальности изучения и картографирования рельефа. Именно в создании методик выделения подобной иерархии геоморфологических объектов Ласточкин видит перспективы динамического (исторического, ге-

нетического) функционального и прочего независимого толкования рельефа для самостоятельного прогноза и соотнесения с геолого-геофизическими и географо-экологическими данными при всех видах исследований [52].

Методика Ласточкина А. Н. схожа с методом пластики рельефа, имевшей широкое применение у почвоведов и ландшафтоведов. Она ориентирована на выявление в пределах геоморфологических поверхностей элементарных поверхностей (геотопов), обладающих, в достаточной мере, неизменными характеристиками (уклон, литология, экспозиция). Дифференциация на геотопы осуществляется на основе существования естественных границ делимости рельефа, в качестве которых выступают структурные линии и характеристические точки (рисунок 1.1) [53]. В готовой карте морфодинамического анализа рельеф территории представляется как совокупность элементарных поверхностей, спектр которых в первую очередь зависит от типа рельефа (его генезиса). Возможности метода морфодинамического анализа оказываются напрямую связанными с масштабом карты и с генетическим типом рельефа. В одном и том же масштабе степень выраженности структурных линий, являющихся границами геотопов для разных типов рельефа, различна.

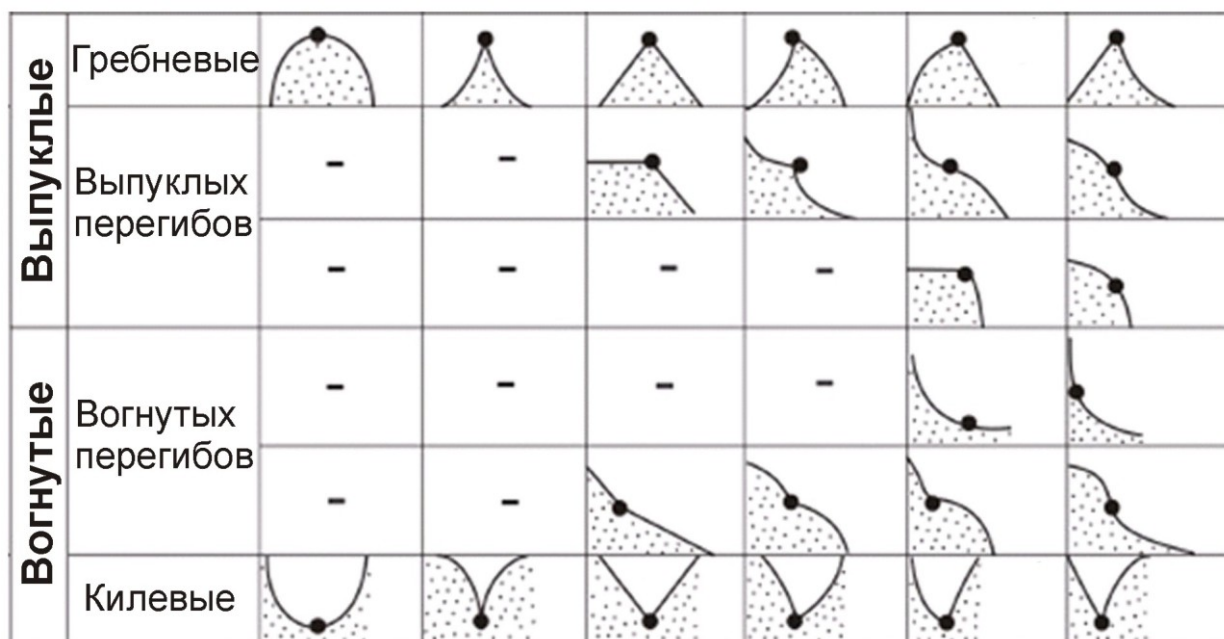


Рисунок 1.1 – Структурные линии рельефа по Ласточкину А. Н. [53]

Морфодинамический анализ оказался эффективным при ландшафтном планировании [9], а также для построения топографической и батиметрической карт [50], поисков железо-марганцевых конкреций на океаническом дне [49], оценки распределения техногенных загрязняющих веществ и при других исследованиях [53]. Однако морфодинамическая концепция пока сложна для восприятия и находится в стадии концептуально-методической разработки, поэтому, несмотря на успешное использование морфодинамической концепции Ласточкина А. Н. в ряде прикладных задач, до сих пор она не завоевала среди геоморфологов статуса общепринятой теоретической основы геоморфологического картографирования.

Объяснительная морфометрия рельефа. Синтез классической геоморфологии и новейших технологий реализуется в современной объяснительной морфометрии рельефа, которая ориентирована на раскрытие связей количественных характеристик рельефа с его происхождением [87]. В рамках этого подхода оказывается возможной математизация описания и анализа форм земной поверхности, элементов, из которых они состоят, а также комплексов, которые они образуют.

Для описания земной поверхности важны два компонента: 1) ее элементарные ячейки – грани, ребра, точки, т. е. морфологически однообразные части, описываемые простой математической функцией; а также 2) структура рельефа как совокупность его пространственной организованности и временных последовательностей элементов. Сочетаясь, элементы рельефа образуют формы, группировки (ассоциации) форм рельефа [89].

Рельеф в отличие от большинства объектов картографирования характеризуется не двухмерностью, а трехмерностью изображения. Зачастую возникает проблема поиска зрительного эффекта объемности при изображении неровностей ЗП на плоскости. Решения проблемы отображения трехмерной поверхности Земли на двухмерный план были заложены в трудах Имгофа Э. и продолжены Заруцкой И. П. [36]. При отображении рельефа на мелкомасштабных картах следовало соблюдать ряд требований, основные из которых: 1) местоположение, форма и размеры любого участка поверхности должны по возможности быть измеряемы;

2) представление картографических данных должно быть максимально ясным; 3) графический каркас должен быть простым, что может быть достигнуто лишь при генерализации отдельных объектов; 4) элементы изображения должны быть сбалансированы как графически, так и по содержанию; 5) процесс создания изображения и его воспроизводства при печати должен быть максимально экономичным. В общей теории картографии к изображению рельефа на картах были выдвинуты три основных требования [6]:

- метричность, позволяющая снимать с карты абсолютные высоты и превышения, характеристики углов наклона, расчленения и др.;
- пластичность, выражающаяся в адекватной передаче неровностей рельефа, формирующая у читателей зрительный образ местности;
- морфологическое соответствие, т. е. картографическое изображение должно отражать типологические особенности форм рельефа, его структурность.

Отображение рельефа на картах тесно связано с ее масштабом. Масштаб соответствует иерархическому уровню объекта картографирования, что влечет за собой разную степень геометрической и содержательной генерализации. Например, на крупномасштабных картах горизонтали являются источником точного значения высоты, а в мелких масштабах показывают положение мега- и макроформ и характеризуют распределение высот по территории [36]. В каждом масштабе, в зависимости от характера рельефа, может быть использовано разное сечение горизонталей. С переходом к мелкому масштабу расширяются допуски по смещению горизонталей (что приводит к снижению надежности горизонталей как источника высоты) и мезоформы в качестве структурных единиц составления рельефа сменяются макроформами. Типы рельефа отображаются на картах как горизонталями, так и методами цветовой и светотеневой пластики. Различные типы рельефа требуют своего подхода, определенной комбинации источников освещения, подчеркивающей его морфологию. При этом резкость границы света и тени отражает остроту и характер перегибов поверхности и является, таким образом, важнейшим индикатором формы и типа рельефа.

Выводы по первому разделу

Геоинформационные технологии изменили сущность и роль картографических изображений: карта перестала быть конечным продуктом, а превратилась в базу геоданных с поддержкой хранения исходных данных на компьютерных носителях и отображения информационных выборок, исходя из нужд пользователя. Инструментарий ГИС-технологий вобрал в себя весь арсенал накопленных географией, картографией и смежными науками о Земле методов изучения конкретных объектов и процессов: методы районирования и географического моделирования геосистем и их компонентов, принципы географической интерполяции и экстраполяции, приемы ключевых исследований, принципы комплексирования и оптимизации, методы географической индикации. Развитие геоинформационных технологий также сделало возможным появление оперативного и динамического картографирования.

Развитие геоинформационного картографирования привело к усилению методологических позиций картографического метода как технологической основы интеграции различных дисциплин в области наук о Земле, поскольку в процесс исследования окружающей действительности было включено промежуточное звено – географическая карта как модель изучаемого явления. При этом карта одновременно является и средством исследования, и его предметом. Такой подход особо актуален для явлений, непосредственное изучение которых невозможно или затруднительно. Одними из самых востребованных при этом являются карты рельефа, которые используются разными отраслями науки: геоморфологией, геологией, геофизикой, гидрологией, метеорологией и климатологией, ландшафтоведением, почвоведением. Многочисленные споры в геоморфологии и картографии связаны с методическими принципами построения карт рельефа. Однако неизменными остаются три основных требования к изображению рельефа на картах: метричность, пластичность, морфологическое соответствие.

2 ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЬЕФА

2.1 Цифровые модели рельефа

«Цифровая модель рельефа (ЦМР) – совокупность (массив, файл) высотных отметок Z , взятых в узлах некоторой сети точек с координатами XU и закодированных в числовом формате» [6, с. 105]. Новоковский Б. А. понимает ЦМР шире, полагая что «цифровые модели рельефа – это особый вид трехмерных математических моделей, представляющий отображение "рельефа" как реальных, так и абстрактных геополей (поверхностей). Цифровые модели являются основой представления данных в автоматизированной картографии» [66, с. 2].

Существуют различные источники получения данных для построения ЦМР:

- оцифровка горизонталей топографических карт. Оцифровка может проводиться с помощью ручных дигитайзеров и сканирования с последующим автоматическим или полуавтоматическим распознаванием. Наибольшую популярность этот метод имел в 1990-х – начале 2000-х гг. в России из-за дороговизны снимков и программного обеспечения;
- стереофотограмметрия, позволяющая строить цифровую модель высот (ЦМВ) на основе стереопары ортотрансформированных дистанционных изображений (аэро- и космоснимков);
- интерферометрия. Позволяет получать ЦМВ по данным радиолокационной съемки с использованием радаров с синтетической апертурной решеткой;
- лазерное сканирование. Широкое распространение лидарных аэросъемок осуществило прорыв в создании крупномасштабных и детальных ЦМВ суши и мелководий (до –60 м). Однако до сих пор удовлетворительно не решены некоторые методические вопросы (в частности, эффективная фильтрация высокочастотного шума), лидарная аэросъемка создает условия для быстрого решения задач с использованием ЦМВ при исследованиях крупного масштаба;

– геодезическая съемка (например, тахеометрическая), кинематическая GPS-съемка используются для получения детальных ЦМР небольших участков местности крупного масштаба. В сверхдетальных полевых и лабораторных исследованиях (например, почвенно-эрозионных при разрешении ЦМВ порядка нескольких миллиметров) применяется наземная стереофотосъемка.

ЦМР в зависимости от формы представления данных можно разделить на три типа [64]:

- 1) с регулярным расположением точек на прямоугольных, треугольных и гексагональных сетках;
- 2) с нерегулярным представлением точек по структурным линиям, профилям, центрам площадей, локальным точкам, случайным сеткам и т. п.;
- 3) с изолинейным (уровненным) заданием точек, расположенных равномерно на изолиниях, либо с учетом их кривизны.

Поскольку программным обеспечением защищаемой работы является ArcGIS, то стоит подробнее остановиться на ее теоретических основах поверхностей [99]. ArcGIS может создавать и хранить четыре типа моделей поверхности: 1) растровые; 2) наборы данных TIN; 3) наборы данных Terrain; 4) наборы данных LAS. Эти модели поверхностей могут быть созданы из множества разных источников данных двумя основными способами: интерполяции и триангуляции.

Растровые модели. Растровые данные представляют собой прямоугольный массив ячеек, организованных в строки и столбцы. Каждая ячейка отображает прямоугольный участок земной поверхности и содержит значение, которое постоянно в любом месте ячейки. Это могут быть данные высот, уровень загрязнений, высота водоносного слоя и т. д. Растровые поверхности обычно хранятся в формате GRID, с ячейками одинакового размера. Чем меньше размер ячейки, тем выше точность грида. Растровый формат удобен для представления цифровых моделей рельефа. В таком случае размер элементарной ячейки (пиксела) является важным параметром, который определяет степень детализации модели и представляет собой пространственное разрешение (рисунок 2.1). Реальное пространственное разрешение ЦМР

варьирует от нескольких сантиметров (данные низковисотной съемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), десятков сантиметров (данные воздушного лазерного сканирования LIDAR) до километров (глобальные ЦМР).

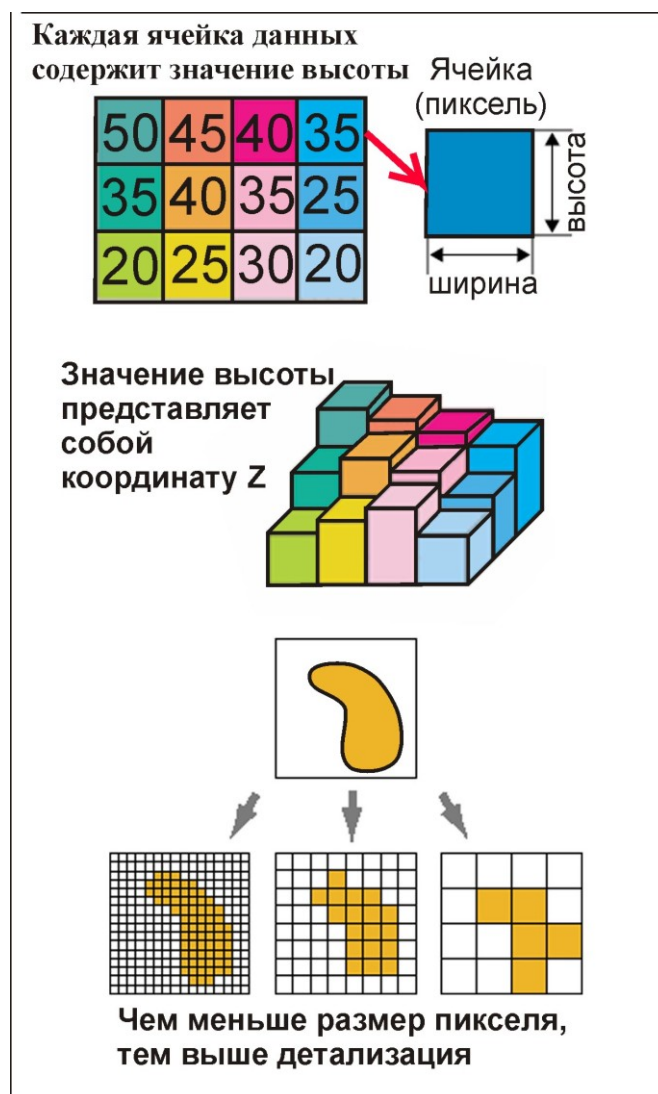


Рисунок 2.1 – Растровое представление цифровых моделей рельефа в ArcGIS [99]

Модели TIN. Нерегулярные сети триангуляции (TIN) являются формой векторных цифровых географических данных, которые строятся методом триангуляции набора вершин (точек). Вершины соединяются серией ребер и формируют сеть треугольников (рисунок 2.2). Существуют различные методы интерполяции для формирования этих треугольников, например, триангуляция Делоне, которую под-

держивает и ArcGIS. Полученная триангуляция соответствует критерию треугольников Делоне, который требует, чтобы внутри окружности, описанной вокруг любого треугольника в сети, не содержалось более ни одной вершины треугольника. Ребра TIN формируют непрерывные, непересекающиеся грани треугольников. Поскольку узлы могут располагаться на поверхности нерегулярно, TIN может иметь более высокое разрешение в тех областях, где поверхность неоднородна или нужна большая детализация, и более низкое разрешение, если поверхность однородна. Модели TIN не так широко доступны, как растровые модели поверхностей, и требуют больше времени для построения и обработки. Стоимость получения высококачественных исходных данных может быть достаточно высока, а обработка TIN, из-за сложности их структуры, несколько менее эффективна, чем обработка растровых данных. Сети TIN обычно используются для моделирования небольших областей с очень высокой точностью, например, в инженерных приложениях, где их использование позволяет проводить вычисления планиметрической площади, площади поверхности и объема. Рельеф в этом случае представляется многогранной поверхностью, каждая грань которой описывается либо линейной функцией (полиэдральная модель), либо полиномиальной поверхностью, коэффициенты которой определяются по значениям в вершинах граней-треугольников [64].

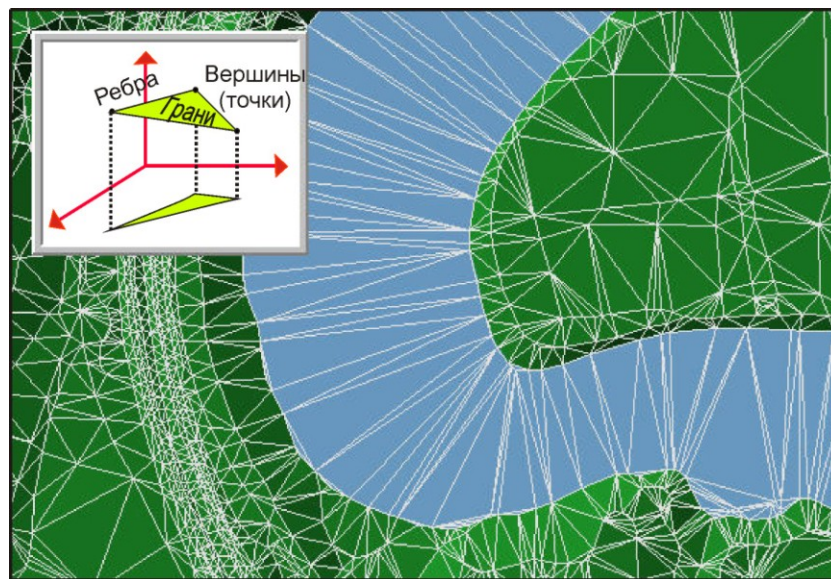


Рисунок 2.2 – Модель поверхности TIN в ArcGIS [99]

Наборы данных Terrain. Наборы данных Terrain представляют собой TIN с переменной разрешающей способностью. Он хранится в SDE базах геоданных и отображается на основе созданных пользователем набора правил и условий для построения упорядоченных TIN-пирамид «на лету». Количество уровней пирамиды, рабочий диапазон масштабов карты для каждого уровня пирамидного слоя и его относительная точность задаются в процессе создания Terrain (рисунок 2.3). Таким образом, существуют разные серии TIN, каждая из которых используется для определенного диапазона картографических масштабов. Очевидное преимущество такого представления данных состоит в том, что для отображения участка в крупном масштабе будет использоваться большое количество узлов, а для генерации TIN с низким разрешением «на лету» будет использован уменьшенный набор узлов. Такой формат подходит для работы с данными LIDAR и SONAR.

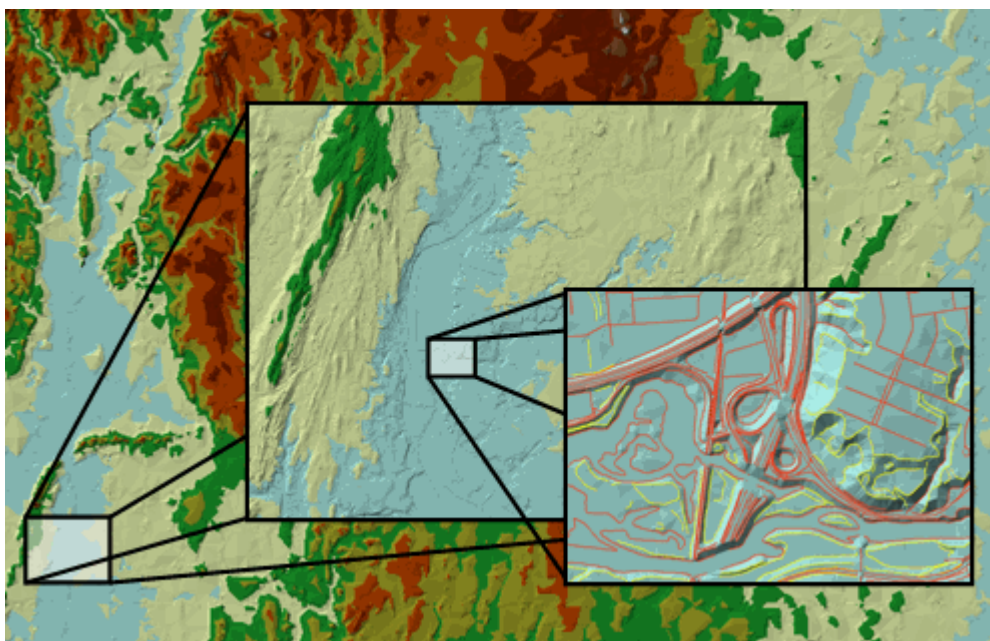


Рисунок 2.3 – Пирамидальная структура набора данных Terrain в ArcGIS [99]

Набор данных LAS. Файл LAS – это стандартный формат для хранения информации, полученной с лидара, а набор данных LAS – это способ работы с ними. Он хранит ссылки на один или несколько файлов LAS на диске, а также на допол-

нительные объекты ограничения поверхности. Ограничениями поверхности являются линии разломов, полигональные водные объекты, границы областей или любые другие типы объектов поверхности. Набор данных LAS позволяет быстро и легко изучать файлы LAS в их исходном формате, получать детализированную статистику и область покрытия.

Файл LAS содержит облако лазерных точечных данных. Каждая точка характеризуется присвоенным ей кодом классификации, который определяет тип объекта, от которого отразился лазерный сигнал. Лидарные точки могут быть классифицированы на категории, такие как поверхность Земли, верхняя граница полога леса, водная поверхность и т. д. Классам присваиваются целочисленные значения кодов, хранящиеся в файлах LAS. Коды классификации были утверждены Американским обществом фотограмметрии и дистанционного зондирования (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ASPRS) для форматов LAS 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4.

Поверхность набора данных LAS представляет собой точки, классифицированные на объекты различного типа (рисунок 2.4). Представление набора данных LAS может изменяться на поверхность TIN, наборы данных Terrain, а также в растр, используя значения высоты, интенсивности или цвета RGB.

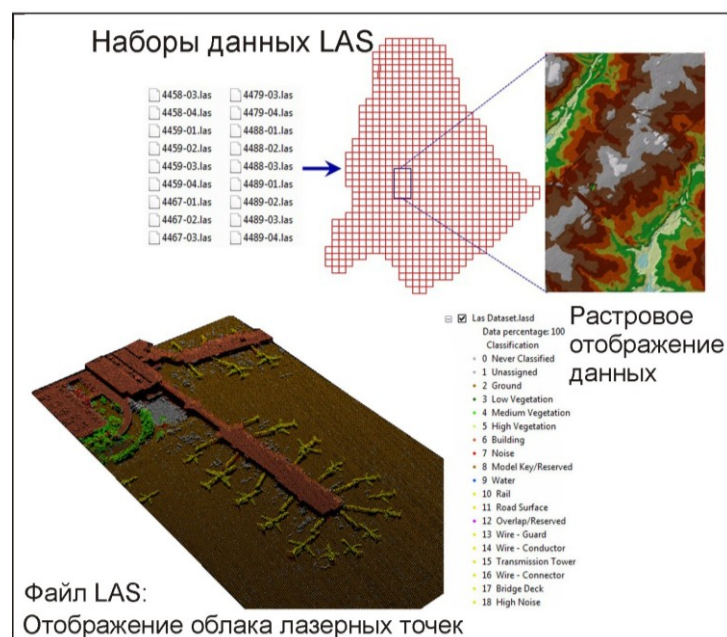


Рисунок 2.4 – Набор данных LAS в ArcGIS [99]

Для возможности придать точкам дополнительную информацию, в стандарт LAS были добавлены Флаги классификации. Для каждой лидарной точки можно установить следующие флаги: синтетическая, ключевая, исключенная и наложения. Например, для записи «вода» можно использовать соответствующий код классификации воды (9), но также можно использовать и флаг «исключаемая». Точка будет по-прежнему оставлена в наборе данных, однако она будет исключена из дополнительного анализа, которому будут подвергнуты файлы LAS.

Из-за дороговизны лидарных данных во многих странах остаются востребованными глобальные цифровые модели рельефа (охватывающие всю или почти всю поверхность земного шара), среди которых есть как бесплатные, находящиеся в свободном доступе в сети Интернет, так и распространяемые на коммерческой основе. Их обзор приведен в таблице 2.1 [23].

Таблица 2.1 – Описание глобальных ЦМР

Продукт	Описание
ЦМР на коммерческой основе	
<i>WorldDEM</i> <i>Разработчик:</i> <i>Airbus Defence and Space</i> <i>Годы создания:</i> <i>2014–2015,</i> <i>продолжает</i> <i>дополняться</i>	Создан по интерферометрическим парам радарных снимков спутников TerraSAR-X и TanDEM-X Доступен в трех вариантах: – WorldDEMcore – необработанная цифровая модель местности (ЦММ), на которой могут быть видны дефекты, присущие радарной съемке, и пропуски информации; – WorldDEM™ – обработанная ЦММ с добавлением гидрографии: речные долины, реки, береговая линия; – WorldDEM DTM – ЦМР с исключением объектов растительного покрова и антропогенных объектов; <i>WorldDEM превосходит все существующие на сегодняшний день ЦМР, полученные по данным дистанционного зондирования Земли, поскольку предоставляет достоверную информацию о рельефе в любой точке земного шара</i>
<i>NextMap World 10*</i> <i>NextMap World 30**</i> <i>Разработчик:</i> <i>Intermap</i> <i>*Год создания: 2015</i> <i>**Год создания: 2012</i>	Созданы путем интеграции данных космической съемки и ЦМР (SRTM, ASTER GDEM2, GTOPO30), а также данных лазерного сканирования со спутника ICESat. Сочетание оптических и радарных данных дистанционного зондирования Земли с данными лазерного сканирования, а также использование уже созданных ЦМР позволило получить глобальные модели рельефа. <i>ЦМР от компании Intermap – хороший пример сочетания качества и цены</i>

Продолжение таблицы 2.1

Продукт	Описание
<i>ALOS AW3D</i> <i>Разработчик:</i> <i>NTT DATA, RESTEC</i> <i>(Япония)</i> <i>Годы создания: 2015–2016</i>	Получены в результате применения алгоритмов потоковой обработки данных с нового радарного спутника ALOS-2 и архивных оптических снимков со спутника ALOS, выведенного из эксплуатации. Предлагаются следующие уровни обработки ЦМР ALOS AW3D: – Level 1 DSM (Raw) – цифровая модель местности по необработанным данным, остаются дефекты съемки; – Level 2 DSM (Standard) – данные, используемые для построения модели, проходят проверку: добавляются непокрытые участки, устраняются ошибки; – Level 3 DTM – ЦМР с вычетом высот зданий и древесной растительности. Дополнительные продукты: – панхроматическое ортофото – ортокорректированные изображения с сенсора PRISM. Область ограничена размером сцены или участком построения DSM/DTM; – цветное ортофото – ортокорректированная мозаика с разрешением 2,5 м на участок продукта DSM или DTM
<i>SPOT DEM (Reference 3D)</i> <i>Разработчик:</i> <i>Spot Image/IGN</i> <i>Год создания: с 2002</i>	Стереопары оптических снимков SPOT5 HRS (более 90%), пробелы заполнены данными SRTM
<i>GMTED2010</i> <i>Разработчик:</i> <i>USGS, NGA</i> <i>Год создания: 2010</i>	Составлена по данным из разных источников (в основном SRTM, а также: CDED, Reference 3D, NED, GEODATA 9 и др.). Является заменой устаревшей GTOPO30
ЦМР открытого доступа	
<i>SRTM C-band*</i> <i>SRTM X-band**</i> <i>Разработчик*: NASA, NGA</i> <i>(США)</i> <i>Разработчик**:</i> <i>DLR (Германия)</i> <i>*Год создания: 2003</i> <i>**Год создания: 2011</i>	Интерферометрические пары радарных снимков сенсоров SIR-C и X-SAR. По результатам съемки SIR-C (SRTM C-band) была создана ЦМР почти 80 % поверхности Земли. В 2011 году по данным съемки сенсора X-SAR Германское аэрокосмическое агентство (DLR) создало ЦМР SRTM X-band с размером ячейки 30 × 30 м. Данная ЦМР содержит значительные пробелы между полосами съемки: чем южнее, тем больше пропусков
<i>ASTER GDEM</i> <i>Разработчик:</i> <i>METI (Япония), NASA</i> <i>(США)</i> <i>Год создания: 2011</i>	Стереопары оптических снимков сенсора ASTER спутника Тетта. Сенсор имеет возможность стереоскопической съемки вдоль полосы пролета с помощью двух телескопов, снимающих в надири и назад в ближнем инфракрасном диапазоне с разрешением 15 м. Для создания ЦМР ASTER GDEM использовалась автоматическая обработка всего архива данных ASTER, насчитывающего 1,5 млн сцен. В 2011 году была создана улучшенная версия ЦМР – ASTER GDEM Version 2: добавлены новые сцены, исправлены ошибки. Для замены некорректных данных использованы другие ЦМР: SRTM, NED (National Elevation Dataset; USGS), CDED (Canada digital elevation data), Alyaska DEM

Окончание таблицы 2.1

Продукт	Описание
<i>ArcticDEM</i> <i>Разработчик:</i> <i>Polar Geospatial Center</i> <i>Год создания: 2015</i>	Цифровая модель поверхности (DSM) Арктики высокого разрешения, построенная с использованием стереопар снимков WorldView-1, WorldView-2 и WorldView-3 и GeoEye-1. Данные ArcticDEM генерируются путем применения методов фотограмметрии с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютера Blue Waters. Регионы, которые покрывает ArcticDEM Release 6: Новая Земля (Россия), Земля Франца-Иосифа (Россия), остров Баффин (Канада), Свальбард (Норвегия), Исландия, полуостров Камчатка (Россия), острова канадских архипелагов в Нунавуте и Северо-Западных территориях (Канада), Фарерские острова и северные и западные районы Гренландии, территория Юкона, Северо-Западные территории, Нунавут (Канада), Северная Сибирь (Россия) и центральные и юго-восточные районы Гренландии, Сибирь (Россия), Скандинавия. В планах у разработчиков охватить все территории севернее 60-й широты

Глобальные ЦМР строятся, в основном, по данным стереоскопической оптической и интерферометрической радиолокационной космической съемки. Геометрическая точность ЦМР зависит от того, по каким исходным снимкам и элементам ориентирования они были получены. Точность глобальных ЦМР традиционно оценивается по более точным моделям высот, имеющихся для отдельных участков, и выражается с помощью различных усредненных показателей, таких, например, как LE90 или СКО. LE90 – пороговое значение для 90 % расхождений. СКО – среднеквадратическая ошибка (вычисленная по расхождениям значений высот между исследуемой глобальной и эталонной моделями).

В таблице 2.2 приводятся усредненные данные о точности модели, которая может отличаться для различных регионов или классов земной поверхности, в зависимости от наклона рельефа и характера местности (открытые территории, покрытые лесом или занятые городской застройкой). Горизонтальный размер ячейки приводится в угловых секундах, поскольку это постоянная величина. Размер ячейки в метрах колеблется в зависимости от географической широты. Приводимое в скобках значение в метрах соответствует горизонтальному размеру ячейки на экваторе.

Таблица 2.2 – Точность и покрытие глобальных ЦМР [23]

Продукт	Покрытие	Размер ячейки сетки, в арксекундах	Абсолютная точность по высоте	Относительная точность по высоте
<i>WorldDEM</i>	Вся земная поверхность	$0,4 \times 0,4$ (12×12 м)	LE90 – 4 м	LE90 – 2 м
<i>NextMap World 10*</i>	Вся земная поверхность	$0,4 \times 0,4$ (10×10 м)	от 10 м (точность зависит от источника данных и от территории)	
<i>NextMap World 30</i>		1×1 (30×30 м)		
<i>ALOS AW3D</i>	Вся земная поверхность	$0,2 \times 0,2$ (5×5 м). По заказу – $0,1$ ($2,5 \times 2,5$ м)	LE90 – от 5 м	
<i>SPOT DEM (Reference 3D)</i>	43 % поверхности земного шара (80 млн кв. км к 2014 г.)	1×1 (30 м, для некоторых территорий 20 м)	10-30 м (в зависимости от уклона рельефа)	5–28 м (в зависимости от уклона рельефа)
<i>SRTM C-band</i>	60° с. ш. – 56° ю. ш. (80 % поверхности земного шара)	1×1 (30×30 м на территорию США); 3×3 (90×90 м на остальной мир)	LE90 – ≤ 16 м	LE90 – ≤ 10 м
<i>SRTM X-band</i>		1×1 (30×30 м)	LE90 – ≤ 16 м	LE90 – ≤ 6 м
<i>ASTER GDEM</i>	83° с. ш. – 83° ю. ш. (99 % поверхности земного шара)	1×1 (30×30 м)	LE90 – 12–30 м	
<i>GMTED2010</i>	84 с. ш. – 56 ю. ш.	7,5 (250 м) 56–60 м 15 (500 м) 58–64 м 30 (1 000 м) 50–82 м	СКО 26–30 м 29–32 м 25–42 м	
<i>ArcticDEM</i>	Более 50 % Арктики (севернее 60° с. ш.)	Часть данных представлена в двухметровом разрешении, часть в пятиметровом		

Нами было осуществлено картографирование форм и типов рельефа для юга Западной Сибири на среднемасштабном уровне исследования. Наиболее подходящими для этого масштаба являются цифровые модели рельефа свободного доступа SRTM (результат интерферометрической радарной съемки) и ASTER GDEM2 (полученная по стереопарам космоснимков). Несмотря на то, что пространственное разрешение ASTER GDEM2 составляет 30 м и превосходит ЦМР SRTM (в работе использовалась версия SRTM C-band с разрешением 90 м), абсолютная ошибка по высоте у первой составляет 12–30 м, у второй – менее 16 м. Для равнинной территории юга Западной Сибири эти показатели еще выше – около нескольких метров.

Оценке погрешностей этих моделей посвящен ряд работ. Погрешность ASTER GDEM2 оценена по набору GPS-реперов [161], по данным альтиметра GLAS (Geoscience Laser Altimeter System), установленного на борту спутника ICESat, по высокоточной модели рельефа (результат воздушного лазерного сканирования (B1C) [71, 72]. Погореловым А. В. с соавторами получена средняя квадратическая ошибка абсолютной высоты модели ASTER GDEM ver.2, которая составила 22 м для Большого Кавказа (массивы Пшехасу и Фишт) [71]. Ими же подробно рассмотрена проблема артефактов или рельефоидов. Если модель «голой Земли» представляет топографическую поверхность (рельеф), то модель, например, растительного покрова, снежников, ледников и других «наложенных объектов» в контексте распространенного определения цифровой модели поверхности представляет «внешнюю оболочку земной поверхности» [17]. При этом вносимая погрешность в значения морфометрических показателей в горах сводится к минимуму, в то время как на равнине наличие «наложенных объектов» может приводить к значительным изменениям морфометрии.

Таким образом, ASTER GDEM ver. 2 характеризуется более высоким разрешением, однако SRTM – более высокой точностью по высоте. Сравнительный анализ показал, что наиболее близкими к SRTM значениями являются цифровые модели высот, уклонов и экспозиций, полученные с топографических карт масштаба 1 : 100 000. Этот факт дает основание считать, что данные SRTM можно использовать для геологического и геоморфологического картирования масштаба 1 : 100 000 [33].

Хотя SRTM считается цифровой моделью рельефа, или, в зарубежной литературе – цифровой моделью высот, по сути она скорее должна считаться цифровой моделью поверхности из-за погрешностей и артефактов, вносимых растительностью [120]. Использование данных спутникового лазерного альтиметра ICESat подтвердило, что ошибки в ЦМР SRTM увеличиваются с высотой деревьев [126]. Это обусловлено тем, что сигнал радара C-band, использованный при съемке, не смог полностью пройти через растительный покров до земной поверх-

ности. Данный вывод поддержан другими исследованиями с использованием спутникового радиолокационного альтиметра для проверки ЦМР SRTM [121]. Коррекция таких ошибок требует знания высоты полога и глубины проникновения радиолокатора.

Необходимо отметить, что требования, предъявляемые к цифровой модели рельефа, должны отвечать целям исследования, масштабу и специфике района. Например, в гидрологическом и гидродинамическом моделировании ошибки из-за растительности в SRTM обычно игнорируются, за исключением сильно залеженных районов, таких как Амазонка [131, 129]. В этом районе погрешности SRTM вносят значительные ошибки в результаты моделирования (прогнозируемый масштаб наводнения, скорость прибывания воды, распространение паводка по площади). Однако исправление погрешностей, вносимых растительностью в SRTM ЦМР, для региона бассейна Амазонки повышает точность моделирования территории затопления от 25 до 94 % [158].

Существуют достаточно простые примеры исправления ошибок, обусловленных растительностью, в данных SRTM за счет применения статических поправок, а именно удаления, пространственного равномерного фиксированного процента высоты растительности из ЦМР [158, 153]. Установлено, что вычитание 50 % высоты древостоя дает наилучшие результаты в их гидродинамической модели, но эта доля может отличаться в разных регионах с другой плотностью растительного покрова. Существуют примеры комплексных методик коррекции растительности, учитывающие высоту и плотность растительного покрова разных регионов и климатических зон [120]. Для этого использовались следующие данные: высота земной поверхности – ICESat GLA14; карта высоты [152] и плотности лесного полога [140]. Полученная О'Лафлином модель «голой Земли» имеет среднеквадратичную и среднюю ошибку по высоте 5,9 и 0,29 м. «Голая Земля» была вычислена на основе SRTM с разрешением 3 арксекунды и доступна для некоммерческого использования.

Цифровые модели рельефа, основанные на данных дистанционного зондирования Земли, содержат в себе систематические ошибки: абсолютное смещение по высоте, полосы шума, спекл-шум и смещение по высоте деревьев. Как рассмотрено выше, существуют примеры работ по снижению ошибок ЦМР по высоте, однако они либо применялись на небольшие территории из-за необходимости частично ручной обработки [158, 156, 136], либо исправляли лишь один источник ошибки, такой как растительность [120]. Недавно для некоммерческого использования в открытом доступе появилась цифровая модель рельефа MERIT DEM (Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM), разработчикам которого удалось исключить указанные погрешности из существующих DEM (SRTM3 v2.1 и AW3D-30m v1) с использованием комбинации нескольких спутниковых наборов данных (SRTM, AW3D, Panoramas' DEM и дополнительно ICESat/GLAS GLA14, U-Maryland Landsat forest cover, NASA Global Forest Height Data, JAMSTEC/U-Tokyo G3WBM water body data). Созданная таким образом улучшенная цифровая модель рельефа с разрешением 3 секунды (~ 90 м на экваторе) охватывает территорию между 90 с. ш. и 60 ю. ш. 90N-60S (геоид EGM96). Разработчики MERIT DEM смогли удалить несколько компонентов ошибки (абсолютное смещение, полосы шума, спекл-шум и смещение по высоте деревьев) от существующих DEM (SRTM3 v2.1 и AW3D-30m v1). Он представляет отметки высот местности с разрешением 3 секунды (~ 90 м на экваторе) и охватывает территорию между 90N-60S, относящимися к геоиду EGM96 [119]. Разработчики утверждают, что после устранения этих ошибок до 58 % территории отображается с точностью по высоте до 2 м, ранее эта цифра составляла 39 %. Основные улучшения отмечены для равнинных территорий.

2.2 Морфометрические показатели

Исследованием количественных (геометрических) свойства рельефа земной поверхности занимается морфометрия, если рассматривать ее в качестве раздела *геоморфологии* [87, 35]. С другой стороны, в *картографии* морфометрия является

графоаналитическим приемом анализа карт, предназначенным для измерения и исчисления по картам показателей формы и структуры объектов [6]. В Толковом словаре по геоинформатике указано, что морфометрия занимается вычислением показателей формы и структуры явлений на основе картометрических определений [17]. Ее теоретико-методологические основы были заложены в нашей стране в середине XX в. Ефремовым Ю. К., Спиридоновым А. И., Волковым Н. М. Существенную роль в ее развитии также сыграли работы Девдариани А. С. по кинематике рельефа, Философова В. П. по анализу рельефа на основе его ранжирования по топокартам, Симонова Ю. Г. и Фролова Ю. С. по характеристике формы элементов рельефа, Червякова В. А. по морфометрии рельефа на основе теории географического поля с использованием метода скользящего кружка, Ласточкина А. Н. по морфодинамическому анализу. В то же время составление морфометрических карт развивалось и зарубежными исследователями [142, 127]. Там это направление получило название «геоморфометрия» и в силу происхождения из многих научных дисциплин ее не принято рассматривать как часть геоморфологии [154].

Морфометрия как графоаналитический прием анализа карт на первых этапах имела дело главным образом, с изображением рельефа на топографических картах. При этом, наиболее ответственным этапом при составлении морфометрических карт рельефа был сбор и картографическая фиксация первичной информации. В качестве исходных могли использоваться как средне- и мелкомасштабные карты, так и крупномасштабные топографические карты на всю территорию или на отдельные ключевые участки с дальнейшей статистической обработкой и экстраполяцией на более крупные территории.

В случае мелко и среднемасштабных карт, количественные оценки параметров уже искажены из-за генерализации при составлении исходных географических карт. Для устранения искажений морфометрических показателей генерализацией использовался точечно-статистический метод на основе разбивки территории на операционно-территориальные единицы (ОТЕ), которые образо-

вывали статистическую поверхность или детерминантно-статистическую модель [24].

Таким образом, применение морфометрического анализа для получения количественной информации о рельефе было весьма трудо- и времязатратно, при этом переход к мелкому масштабу сопровождался снижением точности. Развитие геоинформационных технологий и появление глобальных ЦМР существенно упростило получение массового количественного материала по рельефу и дало толчок развитию его цифрового моделирования. Популяризации морфометрических исследований также способствовало развитию физико-математической теории топографической поверхности [149, 133, 115]. В настоящее время геоморфометрия (geomorphometry) практически является синонимом цифрового моделирования рельефа и представляет собой научную дисциплину, предметом которой служит математическое моделирование и анализ рельефа, а также взаимосвязей между ними и другими компонентами геосистем [104].

Методы геоморфометрии применимы для различных типов поверхности, аппроксимируя их топографической поверхностью. Исходя из теории топографической поверхности, И. В. Флоринский выделяет четыре основные группы морфометрических величин: локальные, нелокальные, солярные, комбинированные [104]. Абсолютная высота (исходные высотные данные цифровой модели рельефа) является базовой величиной для вычисления остальных морфометрических характеристик.

Локальные морфометрические параметры – однозначно определенные характеристики для каждой точки топографической поверхности. Делятся на два класса параметров: форм и потоков. Формы характеризуются различными видами кривизны — минимальная кривизна, максимальная кривизна, средняя кривизна, Гауссова кривизна, несферичность, лапласиан и некоторые другие [104]. Среди параметров, характеризующих потоки, наиболее часто используемыми являются крутизна и экспозиция склонов. Крутизна склонов в градусах находится в диапазоне от 0 до 90°. Геоморфологическое значение этого параметра состоит в том,

что он определяет скорость перемещения потоков вдоль земной поверхности под действием гравитации. Экспозиция склонов представляет собой значения угла, отсчитываемого по часовой стрелке, между направлением на север и проекцией внешней нормали на плоскость в данной точке поверхности. Измеряется в градусах от 0 до 360, а на картах зачастую используется цветовая окраска в зависимости от соответствия направлениям по восьми румбам (север, северо-восток и восток и т. д.). Геоморфологическое значение этого параметра состоит в отображении направления потоков, перемещающихся вдоль земной поверхности под действием гравитации.

Нелокальные морфометрические параметры – характеристики, определяющие относительное положение данной точки на топографической поверхности. Примерами таких величин служат водосборная площадь и дисперсивная площадь. Водосборная площадь – мера площади вышележащих участков, которые могут дренироваться через данную точку поверхности [104]. Стоит отметить, что в геоморфологии интерпретация таких величин предполагает использование таких понятий, как поток, линия тока и водосбор, которые никак не связаны водными потоками, так как в данном случае скорее подразумевается перенос любых веществ под действием силы гравитации.

Солярные морфометрические параметры – количественные характеристики взаимоотношения между топографической поверхностью и солнечной радиацией в зависимости от высоты и углов, определяющих положение Солнца. Наиболее часто используемыми являются такие параметры, как отражательная способность и инсоляция. Теневые модели рельефа, построенные по ЦМР, и в целом сам прием отмывки рельефа (hill shading) в картографии основаны на отражательной способности. Инсоляция – степень перпендикулярности падения солнечных лучей на земную поверхность, определяет температурный режим склонов.

Комбинированные морфометрические параметры – комбинация локальных и нелокальных параметров. В качестве примера можно привести отношение водо-

сборной площади и крутизны склонов, образующих такой параметр, как топографический индекс. В геоморфологической интерпретации служит мерой аккумуляции потоков. Другой параметр, равный произведению водосборной площади и крутизны склонов, позволяет рассчитать индекс мощности потоков и может быть интерпретирован как мера потенциальной эрозионной силы поверхностных потоков [104].

Количество используемых в настоящее время морфометрических показателей велико и продолжает расти. До недавнего времени список базовых (несоставных) морфометрических параметров оставался ограничен шестью: высота, крутизна, экспозиция, горизонтальная и вертикальная кривизна, площадь водосбора. Ряд авторов полагает, что обязательными при проведении морфометрического анализа рельефа являются карты таких показателей, как абсолютная высота, угол наклона, экспозиция [87, 51, 65]. С 70-х гг. прошлого века ведутся работы по созданию системы показателей, способных наиболее полно описать рельеф. Система, предложенная Эвансом И., включает в себя пять параметров: абсолютная высота, крутизна склона, экспозиция, продольная и профильная кривизны [133]. Схожие наборы параметров предлагают Крчо Дж. и Вуд Дж. [149, 162]. В работе Шарого П. А. с соавторами [157] был введен расширенный набор из 18 базовых показателей.

Поскольку рельеф обуславливает поведение водных и литодинамических потоков, локальное и региональное преломление климатических факторов путем перераспределения поступающих на земную поверхность света, тепла и влаги, каждому параметру сопоставляется процесс или явление в ландшафте, которые параметр описывает наилучшим образом [114]. Каждая из этих морфометрических характеристик имеет геоморфологический смысл. По абсолютной высоте территория делится на интервалы высот, соответствующие цикловым поверхностям выравнивания и уступам между ними [11]. *Крутизна склонов* связана со скоростью склоновых процессов, которые перемещаются по земной поверхности под действием силы тяжести или с поверхностным стоком (почвенная, овражная эро-

зия, оползни, осыпи). С *экспозицией склонов* связана скорость склоновых процессов и количество приходящей солнечной радиации. *Плановая кривизна* (степень кривизны горизонталей, отрицательная на вогнутых участках профиля склона и положительная на выпуклых) определяет участки, где происходит конвергенция – концентрация потока и области дивергенции – рассеивания потока, определяя эрозионно-опасные и неопасные области. *Профильная кривизна* (степень кривизны линии профиля в точке, заложенного вдоль направления линии тока отрицательна, когда вогнутость нормального сечения направлена вверх, и положительна в противоположном случае). Профильная кривизна связана с изменением составляющей силы тяжести вдоль склона и отражает изменение скорости перемещения вещества по поверхности склона в направлении от водораздела к подножию склона, т. е. помогает выделить на местности участки преобладания денудации и аккумуляции.

Также структура земной поверхности может характеризоваться такими морфометрическими параметрами, как *горизонтальное расчленение* поверхности (характеризуется суммарной длиной линий, приходящихся на единицу площади), *вертикальное расчленение* (глубина расчленения) – представляет собой разность высот в пределах какого-либо участка. Для характеристики *плотности* обычно используют отношение количества объектов к площади исследуемой территории или отношение площади, занимаемой объектами, к общей площади региона.

В исследованиях также встречается такой показатель, как *энергия рельефа*. Согласно Географическому энциклопедическому словарю, энергия рельефа – это «размах рельефа, степень расчлененности – морфометрический показатель потенциальной интенсивности или возможности проявления тех или иных рельефообразующих процессов, учитывающий расстояние по вертикали между высшими и низшими точками рельефа данного региона и его горизонтальную расчлененность» [16]. Этот параметр дает представление о динамике рельефа [63].

Выводы по второму разделу

Развитие геоинформационных технологий и появление глобальных ЦМР существенно упростило как получение массового количественного материала по рельефу, так и его обработку с помощью морфометрического анализа. В настоящее время геоморфометрия практически является синонимом цифрового моделирования рельефа, целью которого является математическое моделирование и анализ рельефа, а также его взаимосвязей с другими компонентами геосистем.

Для геоморфологических исследований на среднемасштабном уровне наиболее подходящей к использованию является цифровая модель рельефа SRTM. По своей точности она близка к топографическим картам масштаба 1 : 100 000. Однако для нее до сих пор актуальна проблема погрешностей и артефактов, вносимых растительностью. В идеальных условиях для морфометрических исследований должна использоваться модель «голой Земли», т. е. топографическая поверхность без наложенных объектов. Требования, предъявляемые к цифровой модели рельефа, должны отвечать целям исследования, масштабу и специфике района.

3 ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА: ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ

3.1 Дискретный и континуальный подходы к отображению рельефа

Методологически объекты и явления географической среды могут изучаться раздельно или взаимосвязанно. Это имеет прямое отношение к категориям дискретности и непрерывности. Преображенский В. С. [74] применил эти категории для рассмотрения ландшафтной оболочки и составляющих ее природных комплексов. По его представлениям единство дискретности и непрерывности заключается в том, что ландшафтная оболочка представляет собой, с одной стороны, систему компонентов, изменяющихся от места к месту, с другой – систему, состоящую из структурных образований (природных комплексов), т. е. из территориальных систем более низкого ранга. Дискретность Преображенский В. С. видит в скачкообразном изменении воздействий, а непрерывность – в равномерном воздействии источника пропорционально удалению от центра воздействия.

Червяков В. А., рассматривая рельеф как поле высот, описал непрерывность в размещении совокупности однородных объектов с помощью полей особого рода, названных им полями плотности [107]. Площадные (территориальные) плотности он подразделяет на две большие группы: плотности объектов и плотности количественных признаков объектов. Плотность объектов представляет собой отношение суммы однородных предметов (карстовых воронок, оврагов, озер и т. д.) к занимаемой ими площади. Ко второй же группе плотностных характеристик относятся плотности морфометрических признаков объектов. Непрерывность распределения плотностей получается благодаря тому, что объекты рассматриваются не сами по себе, а относятся к территориям, как бы «размазываются» по площадям, становятся их неотъемлемой частью. Степень выраженности полей плотности во многом зависит от следующих свойств слагающих их дискретных ячеек: 1) удаленности объектов друг от друга; 2) четкости границ соприкасающихся объ-

ектов; 3) массовости и 4) динамичности объектов. Чем больше взаимное удаление однородных географических объектов, тем в меньшей степени они взаимодействуют друг с другом, непрерывность уступает место дискретности.

Однако понятия дискретности и континуальности применимы не только к сущности объектов и явлений. Говоря о картографировании в целом, и о ГК в частности, непосредственное практическое значение имеют такие понятия, как дискретное и континуальное отображение. Салищев К. А. выделял десять способов картографического изображения [82]: способ значков, линейных знаков, изолиний, качественного фона, локализованных диаграмм, точечный, ареалов, знаков движения, картограммы и картодиаграммы. В современной морфометрии наиболее типичными и распространенными способами картографического изображения численных показателей рельефа являются дискретные способы – количественный фон и картограмма [106]. К континуальному способу относят изолинии: количественные показатели изменяют свою величину плавно, постепенно, без резких скачков. В контексте ГИС мы мыслим такими понятиями, как растр и вектор. При этом, несмотря на то, что растр является дискретной моделью (поскольку состоит из дискретов – пикселей), он отображает непрерывные явления, в то время как вектор, состоящий из примитивов, отображает дискретную модель действительности.

Континуальные модели рельефа широко используются в области наук о Земле, особенно в ландшафтоведении, геоботанике и др. Это в первую очередь топографические карты и цифровые модели рельефа, а также модели, производные от них. Помимо этого, к континуальным относятся плотностные и интерполяционные модели, которые на сегодняшнем уровне исследований, как правило, вычисляются средствами ГИС. На рисунке 3.1 приведен пример таких континуальных моделей: на рисунке 3.1, *а* – цифровая модель рельефа, дополненная изолиниями, и на рисунке 3.1, *б* – карта проективного покрытия растительности, рассчитанная методом сплайнов по точкам наземных наблюдений [95].

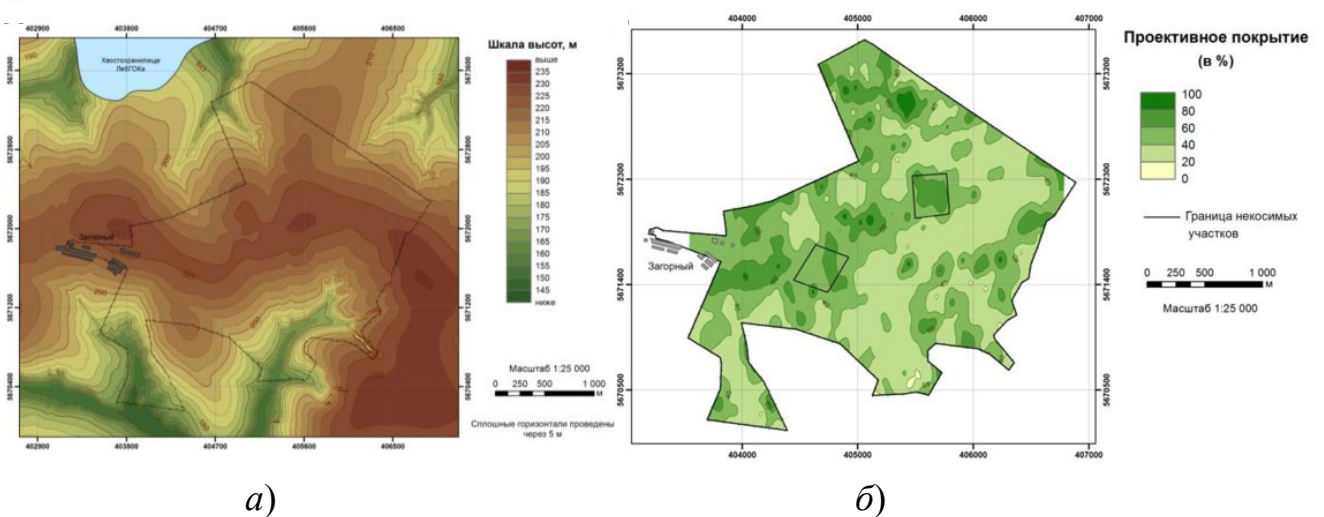


Рисунок 3.1 – Континуальные модели: а) цифровая модель рельефа участка «Ямская степь», дополненная горизонталями; б) карта проективного покрытия растений [95]

Континуальные карты обеспечивают визуальное представление топографии или ее отдельных свойств, но фактические знания приходят от аналитика, который изучает и интерпретирует карту. Несмотря на то, что некоторые исследователи возражают против детерминистического подхода к сегментации поверхности Земли [130], разделение поверхности на отдельные формы остается востребованным, например среди почвоведов [151, 132, 138]. Именно в почвоведении одной из первых методик простой дискретизации континуальной поверхности, выраженной изолиниями топокарты, стала пластика рельефа. В качестве примера на рисунке 3.2 показана методика пластики рельефа по Степанову И. Н. [90], а также проиллюстрирована разница между традиционной картой дна Каспийского моря и картой пластики рельефа этой территории.

По топографической карте отрисовываются тальвеги и окружающие их водоразделы. По точкам перегибов изогипс проводятся морфоизографы – границы между понижениями и повышениями. Одни закрашивают темным цветом, а вторые – светлым, что также дает имитацию объемности изображения, отчего метод пластики иногда называют объемно-графическим. Штрихами и индексами обозначаются обрывы, уступы, террасы, овраги и т. д. Также возможно дополнитель-

ное интерпретационное наполнение карт пластики. Такие карты можно создавать не только для поверхности суши, но и для дна морей и океанов.

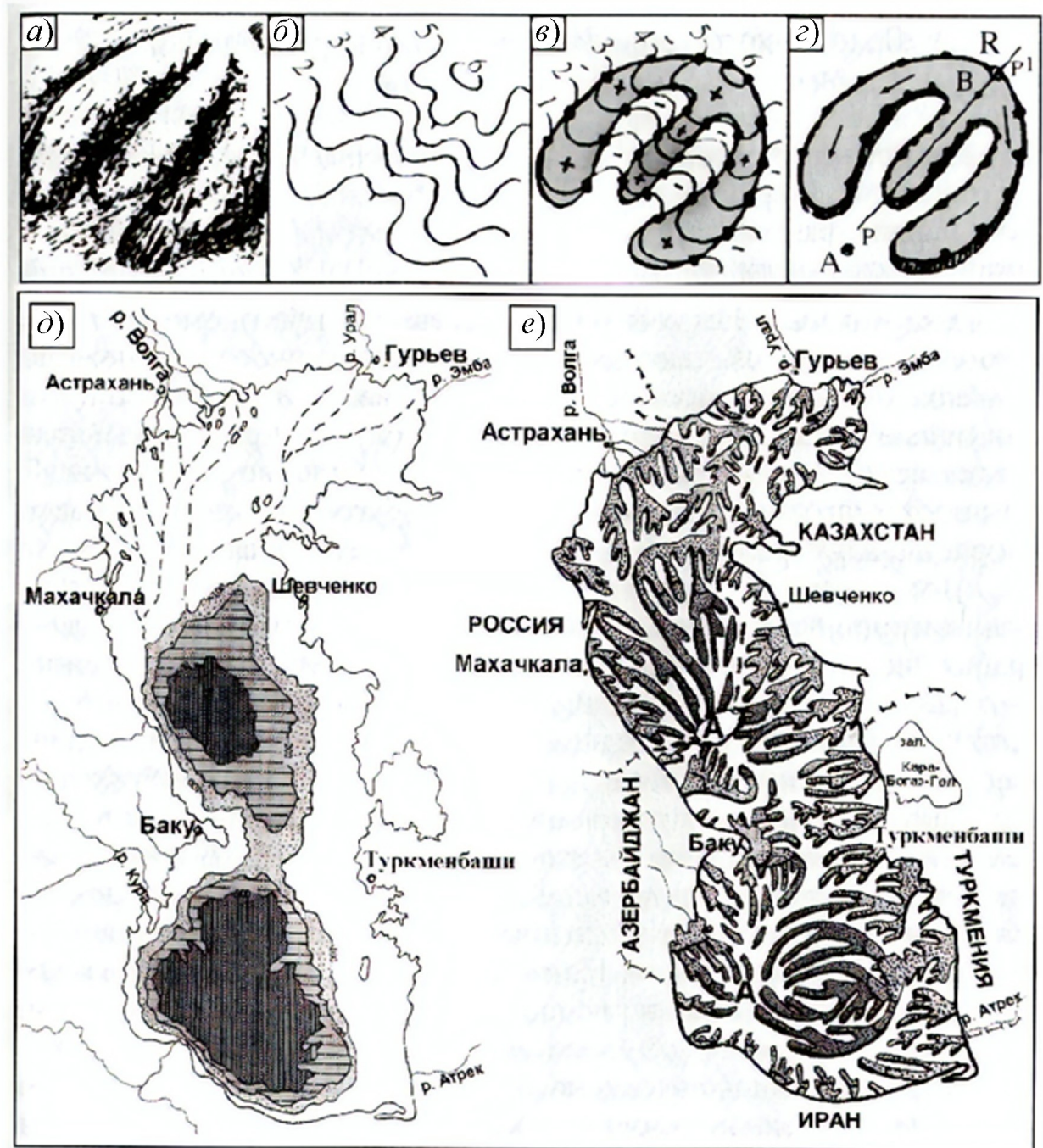


Рисунок 3.2 – Метод пластики рельефа по Степанову [90]: а) натурная зарисовка почвенного тела; б) изображение рельефа горизонталями; в) морфоизографы (отделяют выпуклости от вогнутостей, образуя поток); з) поток в объеме; д) традиционное отображение дна Каспийского моря; е) карта пластики рельефа дна Каспийского моря (выпуклости затемнены)

Разделение рельефа на отдельные объекты может быть полезно для многих научных дисциплин в области наук о Земле при комплексном тематическом картографировании. Дискретные карты сами по себе могут дать больше информации, чем простая визуализация рельефа в виде подложки, поскольку они содержат интерпретационные аспекты. Отмечается, что дискретный способ значительно уступает континуальному как по пластике, так и по метричности изображения, однако в целях повышения наглядности допустимо комбинированное применение обоих способов изображения рельефа [91]. В среде ГИС это можно реализовать добавлением горизонталей рельефа к карте или «натягиванием» карты на ЦМР и визуализацией в полупрозрачном режиме.

3.2 Морфогенетический и морфодинамический подходы к картографированию рельефа

В процессе развития методов картографирования топография и геоморфология стали подходить к отображению рельефа с противоположных позиций. Топография – через *континуальную непрерывность* изогипсами. Для построения же геоморфологической карты необходимо произвести *дискретизацию рельефа*. В 1958 г. Ермолов В. В., опираясь на разработки Ефремова Ю. К., Виттинбурга П. В., Спиридонова А. И. и др., предложил объединять все неровности рельефа внутри генетически однородных поверхностей [34], что позволило совместить морфологическую и генетическую характеристики. Это упростило структуру общей геоморфологической карты, улучшило точность изображения, повысило ее информативность и задало направление развития в сторону системного математического (геометрического) подхода к созданию региональных и локальных геоморфологических карт [56]. Таким образом, сущность морфогенетического подхода состоит в разделении рельефа на генетически дискретные морфологические единицы единого генезиса (формы рельефа) и геометрически правильной рисовке границ между ними.

С течением времени в геоморфологии возникали разногласия из-за конфликта между старыми и новыми идеями в картографировании рельефа, что затормозило выработку единых правил построения геоморфологических карт. Такие противоречия способствовали развитию альтернативных концепций картографирования рельефа. Ласточкин А. Н. стал основоположником нового направления – морфодинамического, и совместно с Зинченко А. Г. им удалось создать единую инструкцию по составлению геоморфологических карт шельфа и континентального склона Российской Федерации для серии листов ГГК-1000/3 [37].

Сторонники морфодинамического подхода главными его достоинствами видят следующие: 1) морфодинамические карты строятся на строгой математической основе понимания рельефа как геометрической поверхности с трехмерными координатами неровностей; 2) подход предусматривает конечное количество геометрических поверхностей; 3) дискретизация континуальной топографической поверхности рассчитывается путем однозначных и точных геометрических построений на основе естественной делимости; 4) морфодинамическая карта может быть каркасной основой для любой карты ландшафтно-экологического содержания, морфогенетической, а также может использоваться в структурно-минерагенических целях и т. п. [56].

Появление цифровых моделей рельефа и развитие ГИС-технологий дало толчок развитию морфогенетического направления в картографировании рельефа, в результате чего появились объяснительная морфометрия Симонова Ю. Г. [87] и теория «геометрической подписи» Пайка Р. [155]. Эти подходы основаны на положении о том, что существует связь между формой рельефа и числовыми параметрами, используемыми для его описания, а также процессами, связанными с его генезисом и эволюцией. Это так же, как и в морфодинамическом подходе, позволяет строго на математической основе подойти к разделению поверхности на морфогенетические типы.

Выбор между морфогенетическим и морфодинамическим принципами в качестве основы разделения рельефа является предметом споров среди геоморфологов. Морфогенетические и морфодинамические критерии широко используются

в геоморфологии для сопоставления и классификации. Морфодинамическое направление постулирует своей целью получение объективной информации о геометрии поверхности Земли для картографирования экзогенной динамики. Его представители полагают, что морфология земной поверхности должна отображаться на картах в неизмененном виде, без научного обобщения картосоставителем. «Такой подход исключает всякий произвол и приблизительность в фиксации границ геоморфологических объектов и гарантирует их строгую формализацию, в том числе и компьютерными средствами без участия человека» [91, с. 179]. Целью морфодинамического анализа является изучение содержания на основе его формы, то есть использование морфологии рельефа для изучения геоморфологических процессов прошлого, настоящего и будущего.

Этот подход схож с методом пластики рельефа и предполагает мягкий переход от континуальности к дискретизации на основе естественной делимости земной поверхности на морфологические элементы. Земная поверхность разбивается на элементарные формы на основе структурных точек, линий и поверхностей, представляющих собой естественные границы делимости. Такой каркас рельефа поверхности дополняется линиями тока, графически они представляют собой векторы литодинамических потоков. Полученная карта фиксирует элементы земной поверхности и предназначена для всевозможных специализированных интерпретаций, в частности в качестве материала для морфодинамического анализа [91]. На рисунке 3.3 показаны основные положения выделения морфосистем при морфодинамическом анализе.

Сочетание различных геопотоков, выделенных элементарных единиц основных экспозиций (гравитационной, инсоляционной, циркуляционной) обособляют отдельные геотопы – необходимые элементы для выделения морфосистем. Построенный таким образом каркас морфосистемы является основой для морфодинамического анализа рельефа. При таком подходе также выделяются иерархические уровни рельефа и генерализации – морфоструктурный, бассейновый и склоновый [92, 70, 94]. На рисунке 3.4 приведен пример карты селевой опасности, построенной на основе ЦМР, морфодинамического анализа и теории морфосистем [93].

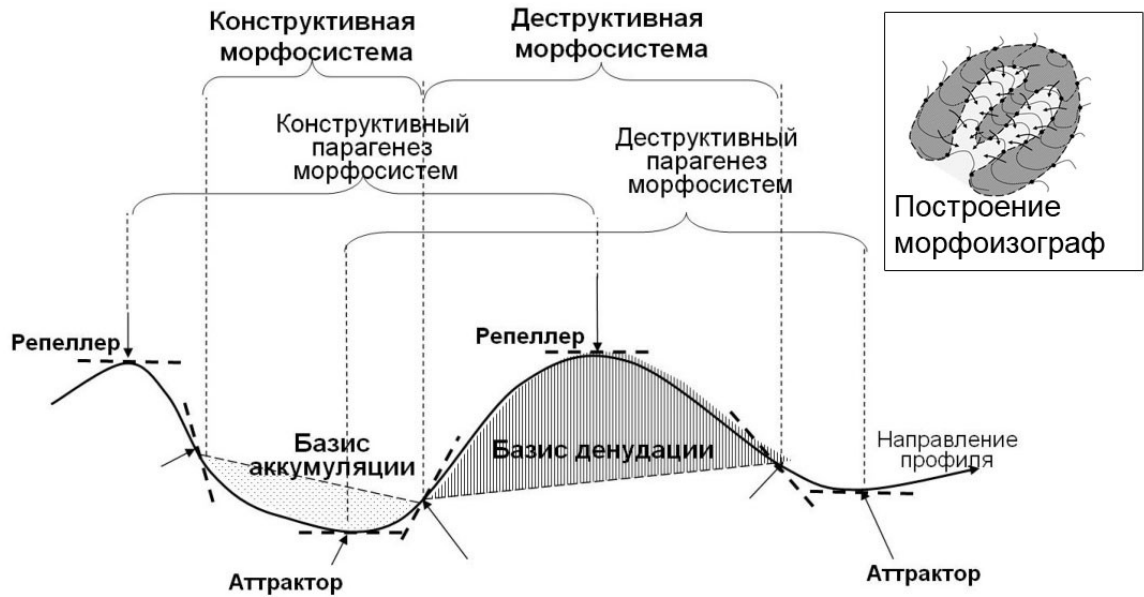
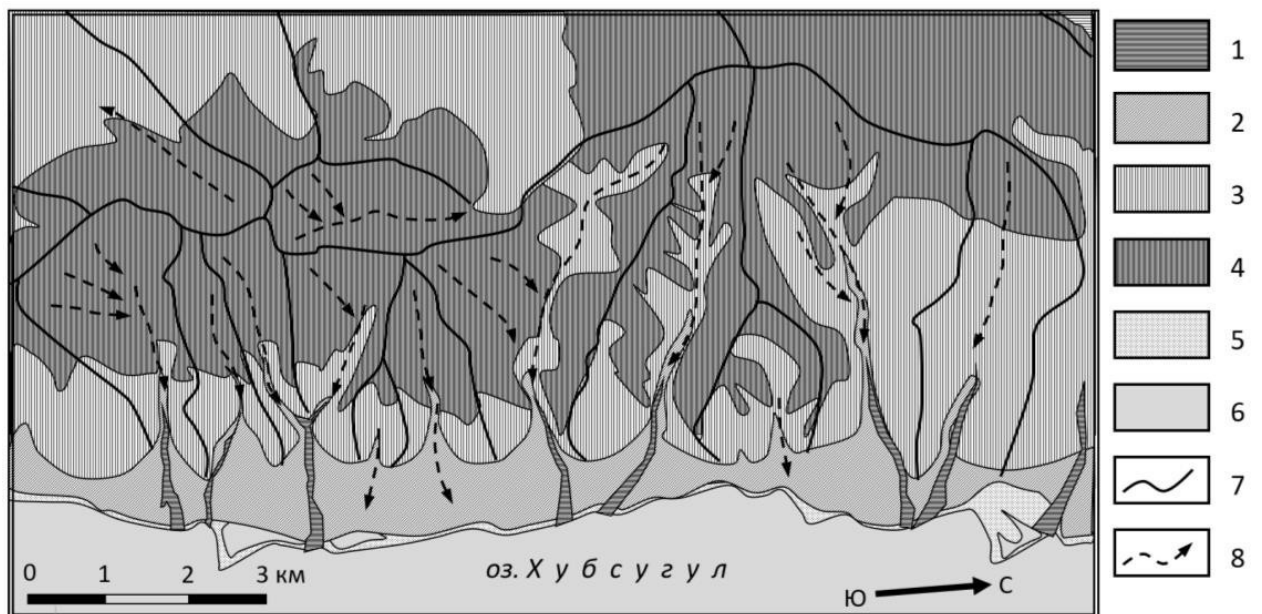


Рисунок 3.3 – Основа для построения морфодинамических карт по Ступину В. П. [91]



1 – зона высокой селеопасности, действующие русла главных водотоков бассейнов; 2 – зона умеренной селеопасности, неактивные участки конусов выноса главных водотоков бассейнов; 3 – горнотаежные склоны водосборных бассейнов; 4 – остепненные склоны водосборных бассейнов; 5 – аккумулятивные береговые формы (пляжи, косы); 6 – акватория озера Хубсугул; 7 – водоразделы селевых бассейновых систем; 8 – потенциально селеопасные русла временных водотоков бассейнов второстепенных порядков

Рисунок 3.4 – Карта селевой опасности участка западного побережья озера Хубсугул по Ступину В. П. [93]

В данной работе мы не будем рассматривать классические методы составления карт форм и типов рельефа вручную, а рассмотрим новейшие методы подхода к этой проблеме, основанные на численном сегментировании и классификации рельефа на его основные формы или элементы форм [134]. Его суть состоит в том, что существует связь между формой рельефа и числовыми параметрами, используемыми для его описания, а также с процессами, связанными с его генезисом и эволюцией. Это означает, что формы рельефа не хаотичны, они структурированы геологическими и геоморфологическими процессами во времени [137, 87]. Пайк Р. представил концепцию использования анализа цифровых данных рельефа для выявления того, что он назвал «геометрической подписью», определяемой как набор измерений, которые описывают форму рельефа достаточно, чтобы различать геоморфологически различные ландшафты [155].

Рельеф земной поверхности характеризуется сложной структурой вложенных иерархий. На основании возрастающей сложности Эванс И. С. выделяет три класса рельефа [134]. Элементарные формы представляют собой наименьшие и простейшие единицы, неделимые при рассматриваемом разрешении. Геометрическая простота облегчает их опознавание в качестве основных блоков для классификации поверхности Земли. Некоторые традиционные формы рельефа являются единичными элементарными формами, но большинство из них сложены из нескольких элементарных форм и представляют собой композитные формы, создавая второй уровень сложности рельефа. Характерные модели, отражающие ассоциации форм, обеспечивают третий уровень сложности и называются физиографическими системами.

МакМилан Р. А. придерживается классификации рельефа, которая включает четыре иерархических уровня [150]. Формы рельефа представляют собой низший уровень иерархии и предназначены для отображения пространственных объектов, обладающих относительно ограниченным диапазоном морфологических признаков и, следовательно, одинаково ограниченным набором внутренних характеристик (состояние влажности, тип почвы, литология). Типы рельефа представляют собой совокупности повторяющихся узоров элементов рельефа с харак-

терным рисунком и масштабом повторения. Они предназначены для приравнивания к катенам или ассоциациям, которые являются наиболее часто отображаемыми биофизическими пространственными объектами, используемыми для управления лесными угодьями. Физиографические системы являются эквивалентом наземных экосистем. Описание и картографирование физиографических систем проводится путем объединения сходных типов рельефа, определенных на более низком уровне. Физиографические регионы являются эквивалентом экорегионов. МакМиланом Р. А. они определялись путем применения программы LandMapR к наборам данных ЦМР грубого разрешения (размер пикселя 1–5 км), а затем объединения полученных пространственных объектов в эквивалент типов рельефа на уровне физиографических регионов [150].

Одна из задач геоморфологов, работающих с моделями рельефа, – получение лучших приближений физической реальности. Природные процессы создают характерные формы и типы рельефа, которые распознаются в полевых условиях или на аэро- и космоснимках. Если эти формы и типы поверхности отражены на ЦМР, их геометрические свойства могут быть извлечены и выражены в числовом формате, т. е. могут быть параметризованы. Параметризация рельефа – это метод пространственного анализа, при котором существуют правила соответствия между вещественными и численными формами [137]. Успешная параметризация поверхности является необходимым условием для адекватной классификации рельефа, под которой подразумевается выделение однородных областей или идентификация конкретных геоморфологических форм, выявленных ранее. Большинство переменных, используемых в классификациях, рассчитываются с использованием первой и второй производных поверхности рельефа. Таким образом, большинство существующих методов автоматической классификации рельефа уходят своими корнями в дифференциальную геометрию. Различия между существующими подходами сосредоточены на том, как наилучшим образом использовать информацию, содержащуюся в морфометрических переменных, и на выборе целевых единиц классификации.

3.3 Численные методы классификации рельефа

Использование численной таксономии в геоморфометрии позволяет выделять единицы рельефа по определенному набору параметров. Список алгоритмов, используемых для вычисления параметров по ЦМР, с годами продолжает расти. Морфометрические параметры делятся на первичные и вторичные. К первичным относятся все показатели, вычисленные напрямую из ЦМР. Вторичные характеристики вычисляются из комбинаций первичных.

Существуют примеры новейших разработок в области определения элементарных форм напрямую из ЦМР. Ясиевиц Дж. и Степински Т. [148] разработали подход к распознаванию элементарных форм, названных ими геоморфонами (рисунки 3.5).

В основе метода лежат принципы машинного зрения, а не дифференциальной геометрии, при котором формы рельефа идентифицируются целостно по характеру локального рельефа, Ясиевиц Дж. и Степински Т. установили 10 выделяемых элементарных частей и считают такой набор достаточным для выделения всех возможных форм рельефа.

Однако наиболее популярными методами классификации рельефа остаются многопараметрические числовые методы анализа. Ряд авторов включают и неморфометрические свойства, отражая параметры растительного покрова, землепользования и почвы [122]. Однако увеличение числа и разнообразия входных параметров может затруднить геоморфологическую интерпретацию полученных элементов рельефа, а также оценку того, насколько тесно формы рельефа связаны с почвой или почвенно-растительным покровом. Многие отмечают необходимость придерживаться принципа парсимонии, иначе известного как бритва Оккама, который гласит, что все модели должны стараться использовать как можно меньше входных параметров для достижения своих целей, в то же время используя столько, сколько абсолютно необходимо для достижения удовлетворительных результатов [150].

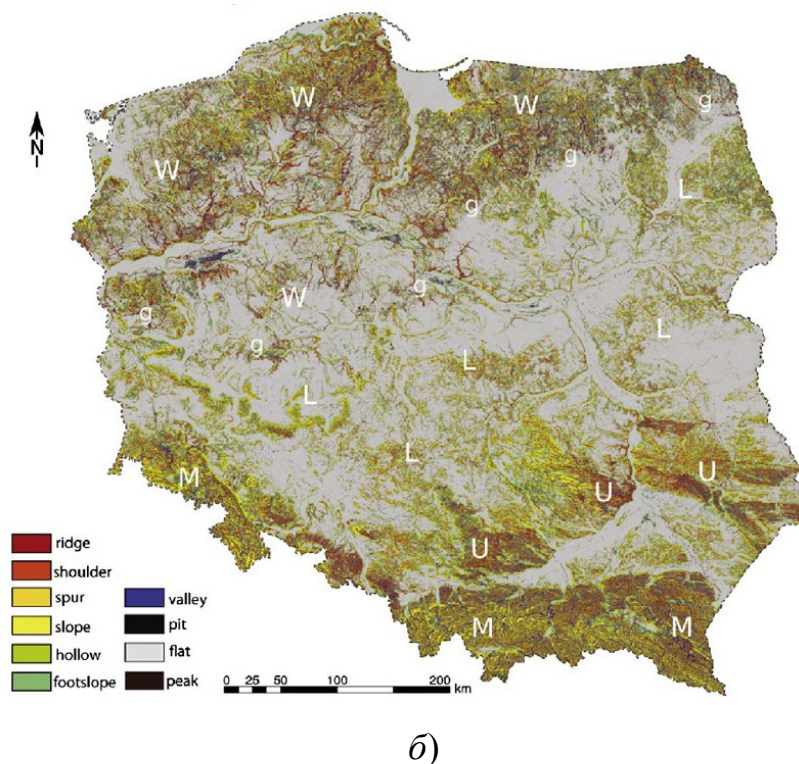
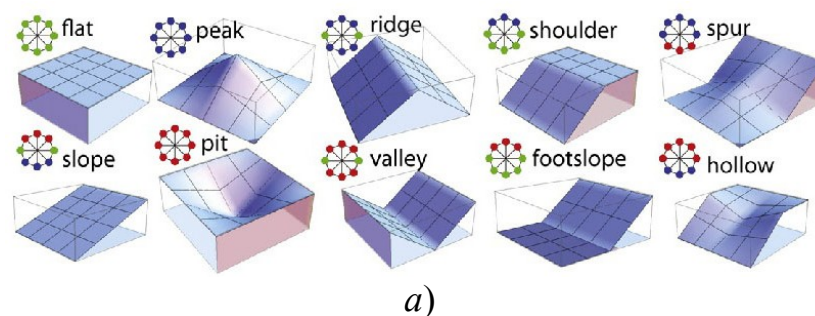


Рисунок 3.5 – Метод распознавания геоморфонов для классификации и картирования рельефа: а) геоморфоны (равнина, пик, хребет, уступ, отрог, склон, колодец, долина, подножие, ложбина); б) геоморфометрическая карта Северо-Восточной Польши [148]

Для эффективного различения форм рельефа или типов рельефа морфометрические параметры должны описывать важные свойства поверхности. Оптимальное число переменных зависит от пространственного масштаба и требований решаемой задачи. Большое количество переменных создало бы неуправляемое число производных категорий и привело бы к ненужному дублированию. Многие параметры, например, относительный рельеф и стандартное отклонение высоты,

описывают один и тот же атрибут формы поверхности. В работах Ивахаши Дж. по созданию карт рельефа в Японии утверждается, что достаточно всего трех переменных: градиент наклона, выпуклость поверхности и текстура (частота встречаемости пространственных объектов) [147].

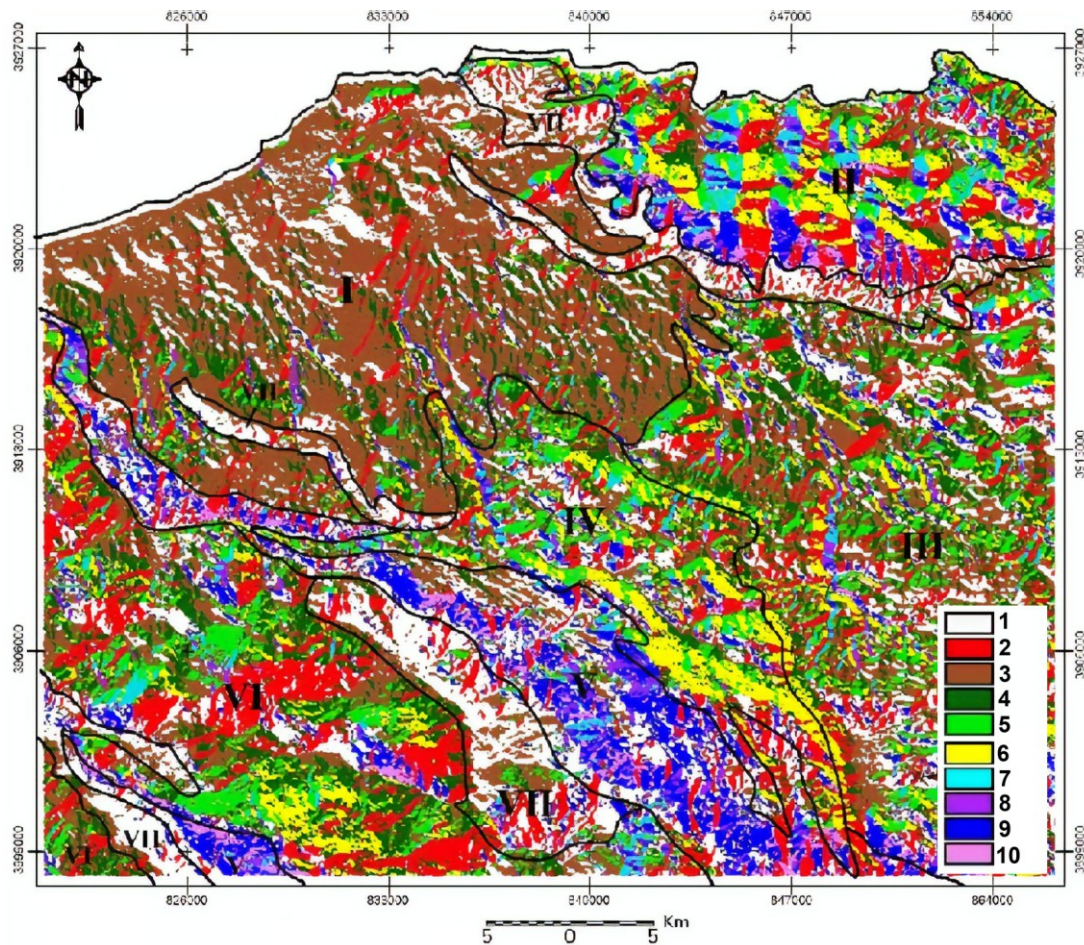
Разделение рельефа может проводиться с использованием различных подходов, включая классификацию морфометрических параметров, методы фильтрации, кластерный анализ и многомерную статистику. Современные методы автоматизированной классификации можно разделить на разные типы, например: 1) попиксельные; 2) объектно-ориентированные. В свою очередь они также могут отличаться в зависимости от классификатора: 1) классификатор, разработанный вручную на основе экспертных знаний и эмпирических данных; 2) классификатор, созданный алгоритмом машинного обучения. Методы можно разделить и по целевым единицам классификации: элементы рельефа, формы рельефа, типы рельефа и т. п.

В настоящее время попиксельный подход часто критикуется [122]. Появление концепции объектного анализа изображений и ее реализация в коммерческих программных пакетах создает предпосылки для разработки усовершенствованных методов классификации геоморфологических элементов. Переход от пиксельного анализа к объектному требует перехода от пикселей, имеющих смысл, к определяемым пользователем объектам, имеющим значение. Технически это требует, чтобы группы пикселей агрегировались в растровом домене в соответствии с предписанными пользователем правилами однородности. Это чаще всего достигается с помощью методов сегментирования данных изображений. Сегментация изображений не нова, но сегодня этот подход гораздо более широко доступен, в связи с нарастающей популярностью ГИС. Наиболее часто используются инструменты многомерной статистики, реализованные в программных пакетах обработки космических снимков. Алгоритмы такой обработки можно разделить на три типа: *неуправляемая классификация, классификация с обучением, классификация на основе экспертной оценки.*

Неуправляемая классификация. Неуправляемые классификации используются для создания набора классов и правил, которые их определяют, когда есть цель создать совершенно новую, статистически определенную классификацию, а не фиксировать и применять существующую систему классификации [150]. Такие подходы максимизируют величину статистических различий в атрибутах между классами.

Как правило, неуправляемые методы классификации первоначально применяются к случайному или систематически выбранному подмножеству общего числа ячеек или точек данных, охватывающих область интереса [125]. Это объясняется тем, что количество и сложность математических вычислений, необходимых для разработки классов на основе статистики, делают непрактичной обработку чрезвычайно больших наборов данных в целом. В некотором смысле эти извлеченные подмножества представляют обучающие данные, но они используются для распознавания новых классов и создания набора правил для классификации, а не для создания эталонных выборок. После разработки приемлемого числа классов неуправляемая классификация может быть применена ко всему множеству (набору данных). В большинстве примеров неуправляемой классификации используется метод нечетких К-средних [135, 125, 146, 71]. Обычно разрабатывается единый набор правил, который применяется ко всей области исследования. На рисунке 3.6 приведен пример классификации методом Isodata острова Крит, в результате которой получено 10 морфометрических классов [128].

Преимущество такой классификации заключается в том, что она создает классы с максимальной величиной статистической разницы в атрибутах. Там, где существующая систематика рельефа отсутствует или неприменима, неуправляемая классификация может дать хорошие результаты [135]. Также она более близка к естественному характеру природных границ, показывая их достаточно размытый характер.



1 – пологие участки юго-западного простирания; 2 – средненаклонные участки юго-восточного простирания; 3 – пологие участки северо- и северо-западного простирания; 4 – полого/средненаклонные участки северо-восточного простирания; 5 – средненаклонные участки северо-северо-западного простирания; 6 – крутонаклонные участки северо-восточного простирания; 7 – крутонаклонные участки северо-западного простирания; 8 – круто/средненаклонные участки западного простирания; 9 – круто/средненаклонные участки юго-западного простирания; 10 – крутонаклонные участки юго- и юго-западного-западного простирания

Рисунок 3.6 – Использование неуправляемой классификации Isodata для выделения 10 однородных морфологических типов рельефа, Крит [128]

Однако неуправляемая классификация имеет свои недостатки. Маловероятно, что при таком подходе возможно воспроизвести те же классы, что и в существующей системе классификации. Кроме того, существующие системы классифи-

кации разрабатывались вручную и могут содержать классы, которые имеют небольшие статические различия. Метод неуправляемой классификации не предназначен для распознавания классов, которые, как правило, похожи и проявляют лишь незначительные и тонкие различия в одном или нескольких атрибутах. Когда требуется выделение наиболее традиционных типов объектов или типов с незначительными различиями, обычно используют методы контролируемых классификаций.

Управляемая классификация. Некоторые исследователи справедливо полагают, что если геоморфологические типы не определены до картографирования и используются многомерные статистические методы, то привязка единиц рельефа к процессу или генезису теряется [123]. Вместо классификации «вслепую» характер геоморфологических единиц может быть определен заранее. Пайк Р. утверждал, что статистические характеристики морфометрических свойств известного набора форм рельефа могут привести к идентификации других форм рельефа данного типа [155]. Им была продемонстрирована эффективность этого подхода для выявления оползнеопасных районов.

Управляемая классификация является наиболее часто используемым подходом для разработки формальных количественных правил автоматической классификации. Основной подход подобных методов состоит в том, чтобы сначала специалисты-интерпретаторы, обладающие необходимыми знаниями о районе исследования, определили ряд областей или отдельных ячеек сетки, в которых, как считается, находится каждый интересующий выходной класс. Эти участки представляют собой эталонные полигоны для обучения классификатора.

Для анализа пространственных отношений между требуемыми выходными классами, определенными эталонными полигонами и всеми доступными входными слоями, можно использовать различные статистические подходы, например анализ главных компонент. Цель, во всех случаях, – создать ряд количественных правил, которые будут определять, как значения данных во входных слоях

связаны с появлением выходных классов или предсказывают их появление. Эти правила основываются на том, какие значения или классы входных слоев наиболее тесно связаны с распознаваемым выходным классом. Они также обычно учитывают, какие входные слои наиболее эффективны или полезны при идентификации конкретного выходного класса.

Для создания правил классификации также можно использовать и другие методы. Популярными подходами являются: дерево классификаций, регрессия, а также аппарат нечеткой логики. Нечеткая логика стала предпочтительным подходом для формализации правил классификации. Нечеткая логика связывает нечеткое правдоподобие каждого выходного класса с каждым значением или классом на каждой входной карте. В классификации с обучением значение правдоподобия выходного класса, возникающего при заданном значении или классе на входной карте, вычисляется путем анализа частоты появления входного значения или класса среди набора обучающих сайтов, выделенных для каждого конкретного выходного класса. Чем чаще определенное входное значение или класс возникает в связи с определенным выходным классом, тем более вероятно, что выходной класс будет иметь определенное значение или класс на уровне входных данных. Некоторые подходы нечеткой логики присваивают различные веса входным слоям для вычисления общего средневзвешенного значения нечеткого правдоподобия.

На рисунке 3.7 показаны результаты управляемой классификации по четырем параметрам (карты уклона и топографической открытости позволили говорить о генетической интерпретации выделов) для острова Хонсю, в результате которой были закартированы формы рельефа, такие как вулканы и аллювиальные равнины [159].

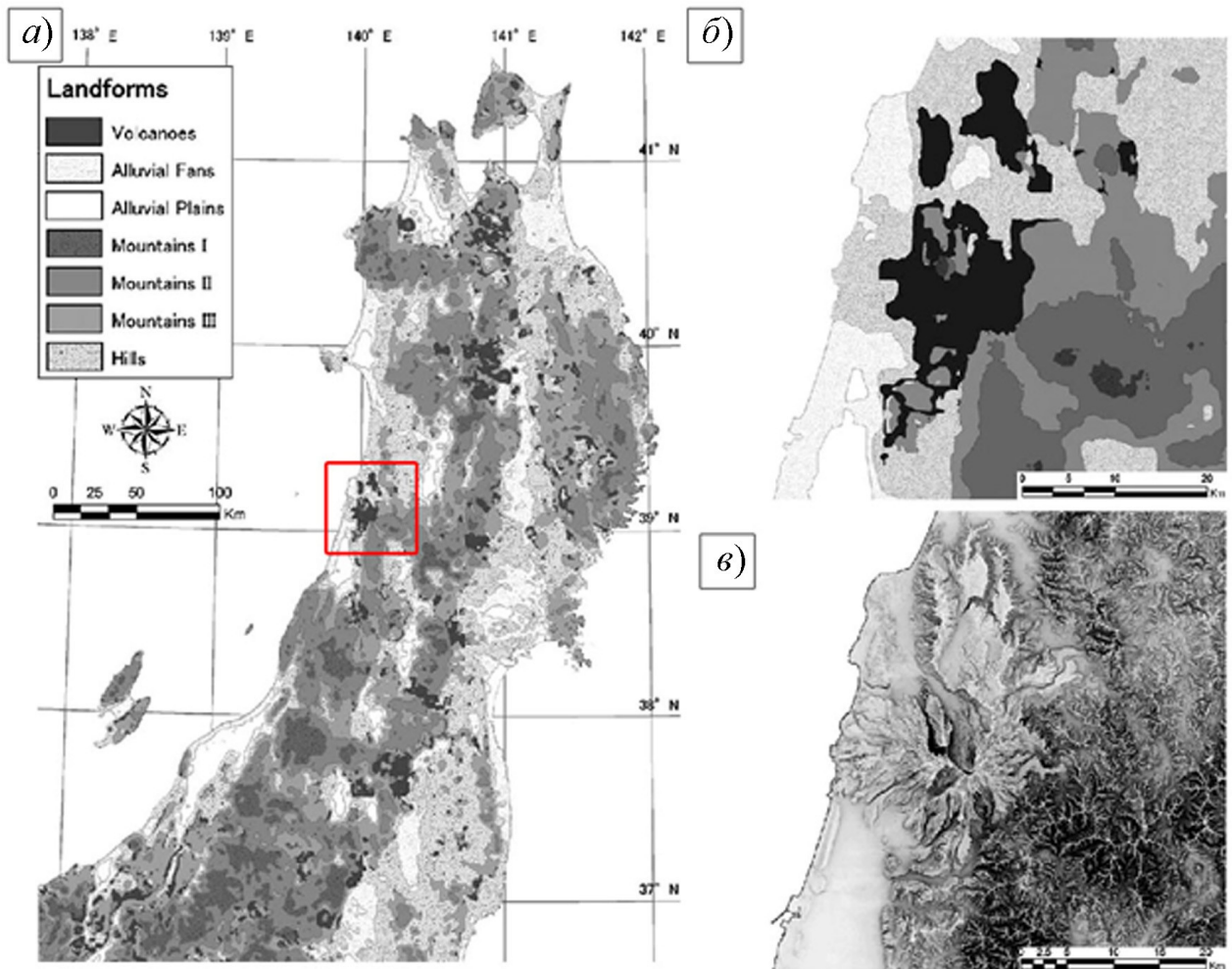


Рисунок 3.7 – Карта классификации рельефа [159]: а) северо-восточной части острова Хонсю; б) фрагмент карты в районе вулкана Чокай; в) морфометрический параметр положительной топографической открытости

Классификация на основе экспертной оценки. МакМилан Р. А. назвал этот тип классификации «эвристическая классификация на основе знаний» [118]. Обычные руководства по составлению карт традиционно используют неявные экспертные знания для разграничения единиц карты и для присвоения атрибутов этих областей. Эти знания, как правило, не формализуются. Например, почвенные карты и их легенды представляют собой структурированные знания, а именно ментальную почвенно-ландшафтную модель ее составителя [124, 118]. МакМилан Р. А. и др. разработали нечеткие правила, основанные исключительно на экспертных эвристических знаниях для автоматической классификации форм рельефа

фа в качестве основы для последующего сопоставления с развитыми на них почвами и их свойствами. Вышеуказанным коллективом авторов применены экспертные эвристические знания о почвенно-рельефных отношениях для присвоения почв автоматически определенным объектам рельефа [118].

Следует отметить, что применение экспертных эвристических знаний не требует сбора и анализа дорогостоящих геолокационных обучающих данных. Системы классификации и картографирования, разработанные человеком, очень часто являются конечным продуктом усвоения и анализа большого объема полевых наблюдений и других данных местными экспертами для создания концептуальных моделей. Маловероятно, что какой-либо набор обучающих данных когда-либо будет столь же обширен, как данные, собранные и проанализированные для создания первоначального набора моделей и правил классификации.

Технологическая схема. Анализ исследований предшественников привел нас к представлениям о том, что наиболее популярные из методик, используемых для сегментирования рельефа в рамках морфогенетического подхода, логично выстраиваются в определенную последовательность применения в зависимости от степени неопределенности геоморфометрических данных, отражающих уровень полноты знаний о картографируемых объектах. В этом аспекте можно выделить несколько таких уровней. Предлагается технологическая схема, включающая в себя четыре уровня полноты знаний о рельефе, каждому из которых соответствует свой комплекс методов геоинформационного картографирования, показанных в Приложении А. Таким образом, подход, ориентированный на распознавание геоморфологических объектов с определенными генетическими характеристиками по морфометрическим характеристикам, подразумевает предварительный этап проработки имеющихся данных, среди которых: данные государственного геологического картирования, литературные и фондовые источники о происхождении и возрасте рельефа изучаемой территории, материалы полевых исследований. Наличие таких данных характеризует уровень определенности в исследовании и позволяет выбрать подходящую технологию.

Каждому из четырех выделенных уровней полноты знаний о рельефе (и соответственно каждому уровню определенности морфогенетических данных) соответствует своя предметная область исследования. В первом случае (I уровень определенности данных) рельеф рассматривается, как правило, лишь в одном из аспектов, исходя из задач какого-либо тематического исследования. То есть один или несколько параметров рельефа выступают вместе с другими тематическими данными из смежных специальностей в качестве индикаторов. Во втором случае – выделяются однородные (гомогенные) типы рельефа. В третьем – формы и гетерогенные типы рельефа (с определенным соотношением форм рельефа). Четвертый уровень (наиболее полный уровень знаний о рельефе) позволяет рассматривать рельеф как абиотическую составляющую геосистем. Технологические приемы предшествующих уровней могут быть использованы на более высоком уровне полноты знаний (определенности данных).

Выводы по третьему разделу

Рельеф может рассматриваться и как континуальная поверхность, и как дискретная. Континуальные модели рельефа широко используются в области наук о Земле, особенно в ландшафтоведении, геоботанике и др. Это в первую очередь топографические карты и цифровые модели рельефа, а также модели, производные от них. В то же время, разделение рельефа на отдельные объекты может быть полезно для многих научных дисциплин в области наук о Земле при комплексном тематическом картографировании. Дискретные карты сами по себе могут дать больше информации, чем простая визуализация рельефа в виде подложки, поскольку они содержат интерпретационные аспекты.

В рамках направления, ориентированного на дискретизацию рельефа при геоморфологическом картографировании, наиболее популярными являются морфодинамический и морфогенетический подходы. Выбор между морфогенетическим и морфодинамическим принципами в качестве основы разделения рельефа является предметом споров среди геоморфологов. Морфодинамический подход

схож с методом пластики рельефа и предполагает мягкий переход от континуальности к дискретизации на основе естественной делимости земной поверхности на морфологические элементы. Появление цифровых моделей рельефа и развитие ГИС-технологий дало толчок развитию морфогенетического направления в картографировании рельефа, в результате чего появились объяснительная морфометрия Симонова Ю. Г. и теория «геометрической подписи» Пайка Р. Эти подходы основаны на положении том, что существует связь между формой рельефа и числовыми параметрами, используемыми для его описания, а также процессами, связанными с его генезисом и эволюцией. Это так же, как и в морфодинамическом подходе, позволяет строго на математической основе подойти к разделению поверхности на морфогенетические типы.

Анализ исследований предшественников привел нас к представлениям о том, что наиболее популярные из методик, используемых для сегментирования рельефа в рамках морфогенетического подхода, логично выстраиваются в определенную последовательность применения в зависимости от степени недоопределенности геоморфометрических данных, отражающих уровень полноты знаний о картографируемых объектах. Таким образом, была разработана методика и предложена ее технологическая схема, включающая в себя четыре уровня полноты знаний о рельефе, каждому из которых соответствует свой комплекс методов геоинформационного картографирования.

4 ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЙОНОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, УДОВЛЕТВОРЯЮЩИХ УСЛОВИЯМ, ЗАДАЮЩИМСЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ

4.1 Геоинформационное моделирование условий обитания, благоприятных для проживания древнего человека в горах Алтая

Процедура геоинформационного моделирования районов управляется пользователем. При этом критерии разрабатываются исходя из цели исследования. Такая методика позволяет решать различные тематические задачи [110]. Одним из примеров является геоинформационное моделирование условий обитания, благоприятных для проживания древнего человека в горах Алтая.

Древний человек был вынужден адаптироваться к окружающей его среде. О благоприятности условий проживания можно судить на основе того, какие ландшафты служили кормовой базой древнему человеку. Рельеф местности, представляя собой каркас геосистемы, позволяет воссоздавать возможные палео-обстановки. Обладая полнотой данных на эту территорию (например, обширными археологическими и палеонтологическими материалами), постановка задачи могла бы включать полную реконструкцию палеоландшафтов. Однако, в условиях недоопределенности, которую мы имеем, можно лишь выявить участки, наиболее благоприятные для проживания палеолитического человека. Такая постановка задачи имеет практическое значение при оптимизации поиска новых палеолитических стоянок.

На протяжении ряда лет сотрудниками института археологии и этнографии СО РАН и лаборатории ГИС и дистанционного зондирования (ДЗ) Института геологии и минералогии Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН) ведутся совместные исследования в области «ландшафтной археологии». Цель таких исследований состоит в том, чтобы на основе пространственного ГИС-анализа установить закономерности приуроченности археологических памятников к различным палеогеографическим обстановкам. Исследования прово-

дятся преимущественно на территории Западной Сибири, охватывая различные хроностратиграфические интервалы (от палеолита до средневековья).

Геоинформационная модель построена для территории Республики Алтай, вдоль трассы проектировавшегося в 2011–2012 гг. газопровода [22]. Полученная модель верифицирована на основе 35 известных палеолитических памятников, из которых 27 открыты осенью 2011 г. [78], остальные ранее [29, 75, 42]. В качестве основных критериев, обуславливающих локализацию стоянок человека эпохи палеолита на территории Горного Алтая на основе археологической экспертной оценки (Постнов А. В., Славинский В. С., Цыбанков А. А.), были выделены:

- наличие ровных пологих площадок, пригодных для поселения;
- тепло-светообеспеченность территории (освещенность пологих склонов и площадок);
- близость к источникам каменного сырья;
- водообеспеченность (наличие рек, а также узлов их слияния).

Наличие ровных пологих площадок. Поскольку стоянки древнего человека обычно расположены на пологих, хорошо освещенных склонах, для определения таких благоприятных мест построен морфометрический показатель уклона рельефа и по нему выделены области с углами падения склонов не более 10 градусов.

Тепло-светообеспеченность. Для построения этих характеристик был использован такой солярный морфометрический параметр, как отражательная способность, или теневая модель рельефа. Отдельно на июль и январь было создано несколько теневых моделей рельефа по ЦМР с разным углом и высотой Солнца на время восхода, полдень, заход, а также две промежуточные. Точное время восхода, полудня и заката для данной территории рассчитывалось с использованием астрономического калькулятора (<http://suncalc.net>), а точное положение Солнца на небесной полусфере (азимут и угол) в это время определялось с помощью калькулятора положения Солнца (<http://planetcalc.com>). В связи с вытянутостью территории в направлении север-юг эти показатели усреднялись. Интегральная схема освещенности за сутки была получена путем сложения всех пяти теневых моделей (с помощью проце-

дуры сложения сеток, которая представлена в ArcGIS). Статистическая обработка показателей свето- и теплообеспеченности выявляла наиболее освещенные участки для зимнего и летнего времени.

Близость к источникам каменного сырья. Для изготовления каменных орудий наиболее пригодными являются роговики и вторичнокремнистые песчаники и некоторые другие породы, которые зачастую образуются в контактных зонах интрузий с терригенными породами, а также в кислых эффузивных массивах [48]. Для создания в ГИС-проекте слоя источников сырья для данной территории были оцифрованы с геологической карты интрузии, вокруг которых построены буферные зоны от 50 до 500 м. Размер буфера варьировал в зависимости от размера самой интрузии и ширины контактной зоны. Интрузии накладывались на векторную геологическую карту для проверки на вмещающие породы, с помощью оверлейных операций выделялись только те, куда попадали терригенные толщи. Кислые эффузивные породы снимались сразу с карты, поскольку они сами по себе пригодны для изготовления каменных орудий.

Водообеспеченность. Радиус для построения буферных зон вокруг гидросети брался равным 400 м. Такое расстояние обеспечивает необходимый доступ к такому важному ресурсу, как источник для питья и других бытовых нужд, но обеспечивает некоторую защиту от экстремального повышения уровня воды в реке. Помимо этого дробленные и окатанные породы, переносимые рекой, являются дополнительным источником каменного сырья.

Полученные геоинформационные слои стали основой для анализа распределения мест стоянок древнего человека на исследуемой территории в зависимости от контролирующих факторов. Фрагмент построенной модели показан на рисунке 4.1.

Верификация модели показала, что на пологие площадки попадают все 35 стоянок, при этом их площадь по отношению к остальной исследуемой территории составляет не более 30 %, а площадь освещенных пологих участков составляет не более 16,8 %. Из них 30 стоянок располагаются на освещенных участках: 13 стоянок освещены только в зимнее время, 14 – только в летнее, 3 стоянки ос-

вещены круглогодично. Пять стоянок палеолита расположены в неосвещенных местах, расположенных в достаточно узких долинах, и, по всей видимости, выбирались по каким-то другим причинам (возможно, как убежища).

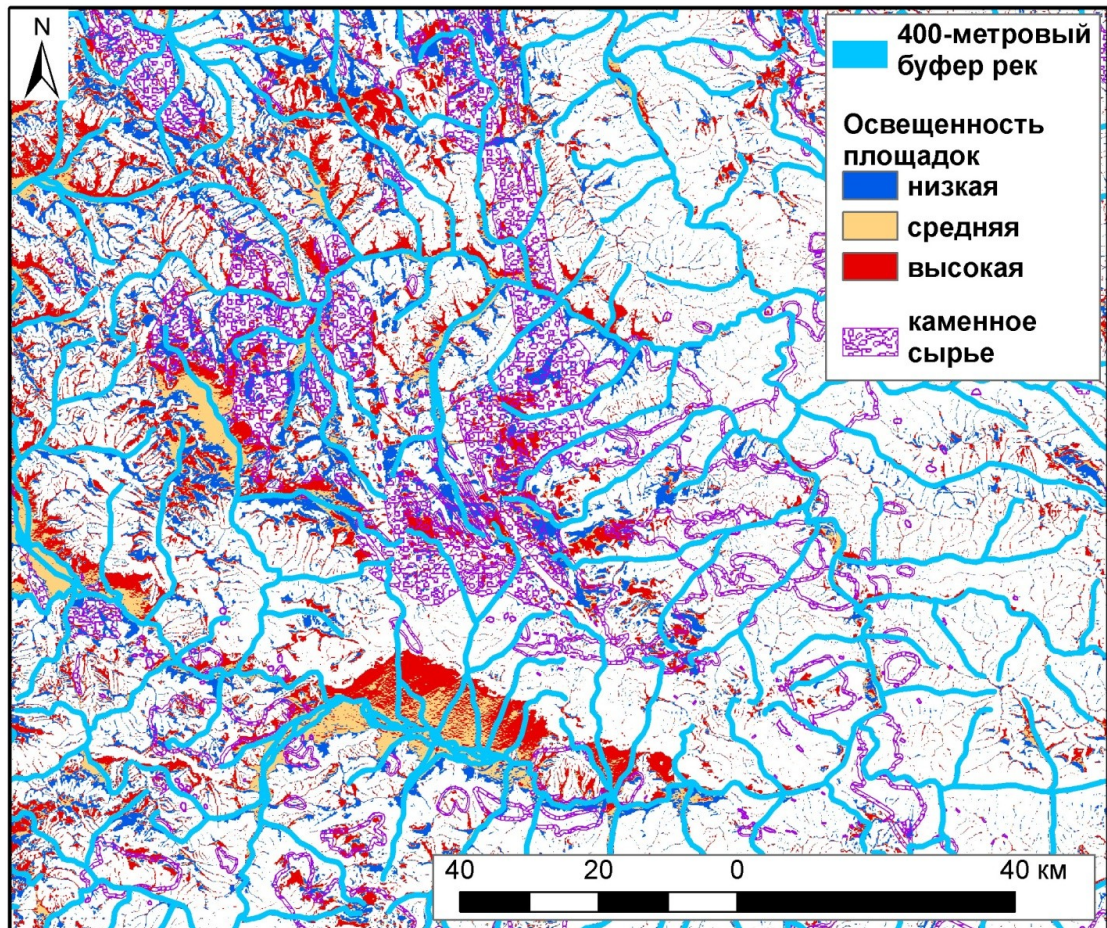


Рисунок 4.1 – Геоинформационная модель условий обитания, благоприятных для проживания древнего человека в горах Алтая (фрагмент)

Считается, что для древнего человека 5 км является наиболее удобным расстоянием, на которое он может перемещаться за какими-либо источниками, важными для его жизнедеятельности, то есть не более чем час-полтора пешего хода. Это касается и источников каменного сырья. Поэтому были построены буферные зоны радиусом 5 км вокруг источников каменного сырья. Верификация показала, что в них попало 33 стоянки, а другие две расположены менее чем в десяти километрах от ближайшего источника сырья.

Анализ близости стоянок древнего человека к рекам показал, что большинство стоянок (27) расположены не более чем в 400 м от русла ближайшей реки. Помимо близости к рекам для древних людей зачастую индикаторным признаком является близость к местам слияния рек. Однако в данном случае было замечено, что только шесть стоянок находятся в 400-метровой зоне вокруг точки слияния рек, но затем было выяснено, что 31 стоянка находится на расстоянии 2 км от точки слияния.

Проведенное моделирование выявило, что хорошо освещенные пологие склоны являются ключевым определяющим условием перспективности поиска археологических стоянок палеолитического человека на территории Горного Алтая. Другие два важных фактора, такие как близость к источникам каменного сырья и рекам, учитывают мобильность человека. За каменным сырьем он способен перемещаться на 5 км (хотя дальнейший анализ показал, что 80 % памятников находятся в трехкилометровой зоне), в то время как 400 м является для него комфортным расстоянием до ближайших рек. Это позволило сделать вывод, что выбранные критерии действительно значимы и подходят для оптимизации поиска памятников палеолита. Однако выявленные закономерности применимы именно для данного региона.

4.2 Неотектоническое районирование северо-запада Горного Алтая

Геоморфометрические характеристики могут использоваться для дифференциации географического пространства. Типы дифференциации: 1) ареализация (по принципу распространения какого-либо признака); 2) зонирование (по качественному признаку, например, плотность распространения); 3) районирование (выделение района на основе связи, процесса, взаимодействия). Отметим, что «районирование служит конкретной цели, которая определяет набор признаков и число выделяемых районов. В отличие от ареала, район внутренне неоднороден, так как для него всегда характерна та или иная внутренняя территориальная организация, тогда как для ареала типично лишь состояние внутренней однородности» [84, с. 415].

Неотектоническое районирование является частным случаем морфотектонического анализа, цель которого – выявление закономерностей пространствен-

ной организации рельефа, то есть повторяющихся типов ориентированных структур, выделение морфотипов «морфоструктур» и градиентных структур [28, 88, 61]. Основы использования морфометрического анализа рельефа в геологических исследованиях заложил Философов В. П., разработав методику поиска тектонических структур для прогноза нефтегазоносности [103]. Морфометрические показатели на разных масштабных уровнях отображают разные особенности геологического строения территории: от литологического состава комплексов пород (является важным параметром, определяя различную уязвимость к эрозионно-денудационным процессам) до докайнозойского структурного плана.

В качестве основы для неотектонического районирования северо-западной части Горного Алтая была выбрана ЦМР SRTM с разрешением три арксенды (90×60 м). В дальнейшем ЦМР была генерализована до разрешения $180''$. По цифровой модели рельефа были достаточно традиционные морфометрические показатели: глубина и густота эрозионного расчленения, средние высоты и тренды поверхности, средние углы падения склонов, их градиенты и др. [41]. На рисунке 4.2, *а*, *б*, *в* показаны некоторые морфометрические показатели с разрешением 180 м и в радиусе скользящего окна 5 км. На рисунке 4.2, *г* показаны контуры геологических тел, представляющие собой докайнозойский структурный план территории.

Расчлененность рельефа отражается на таком показателе, как плотность ребер (рисунок 4.2, *а*). Ребра рельефа представляют собой перегибы земной поверхности, соответствующие линиям тальвегов и водоразделов, и имеют максимальные значения второй производной от ЦМР. По выделенным ребрам строится плотностная схема в скользящем окне. Для того чтобы была возможность анализировать различные показатели сопряженно (например, с использованием факторного и кластерного анализа в многомерном пространстве признаков), показатели нормируются на максимум. Глубину расчлененности рельефа можно оценить по отклонению значений высот от усредненного тренда поверхности. Этот показатель представляет собой разницу между значениями высот цифровой моделью рельефа и ее средним значением, рассчитанном в скользящем окне радиусом 10 км. На рисунке 4.2, *б* отрицательные отклонения от тренда показаны цветом от белого до светло-серого,

а положительные – цветом от темно-серого до черного. На рисунке 4.2, в показано среднее значение углов, параметр нормирован на максимум и разбит на пять равных интервалов. По большинству показателей прослеживается связь морфометрических показателей с ориентировкой геологических структур территории и, следовательно, с докайнозойским структурным планом (см. рисунок 4.2, г).

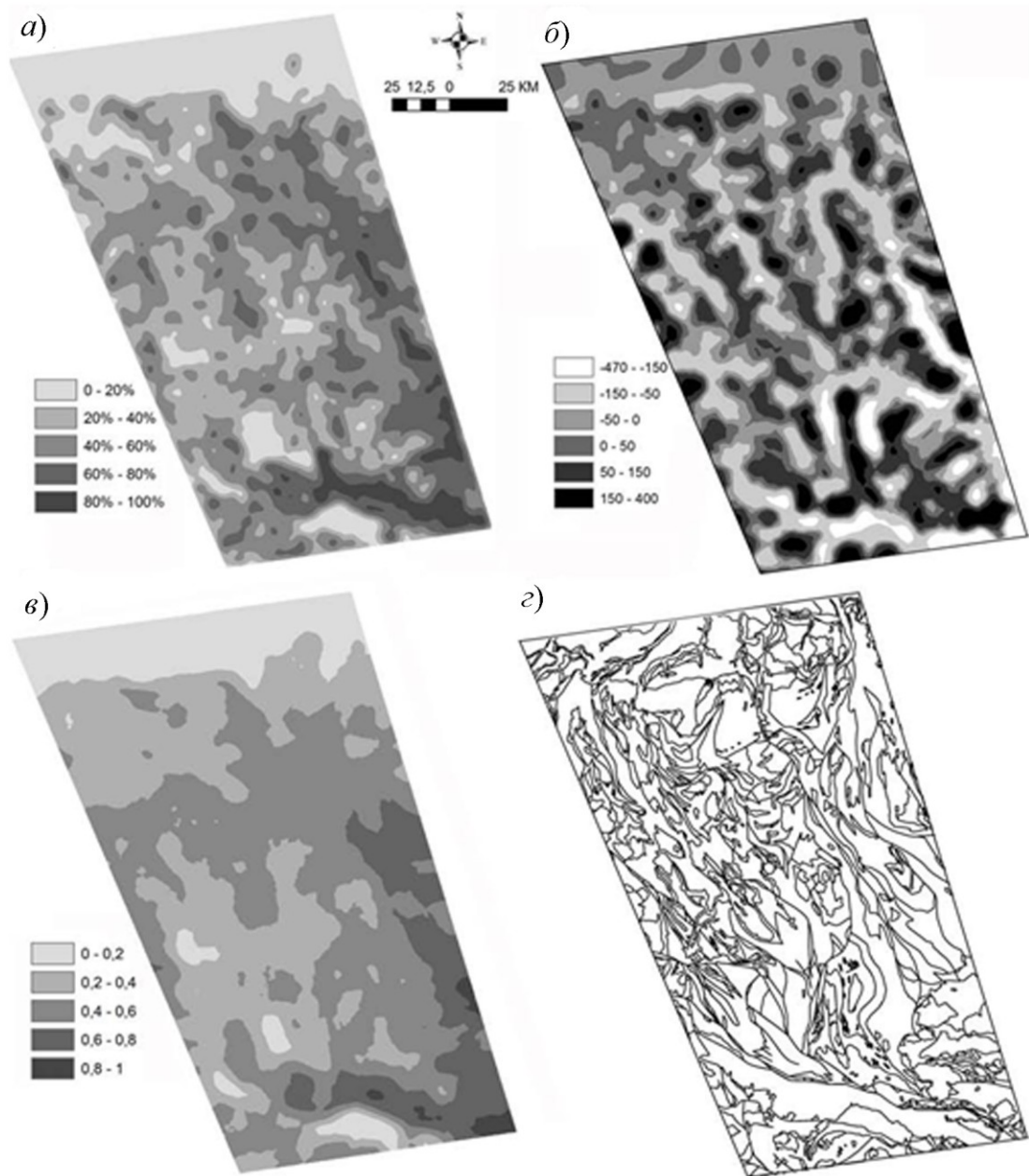


Рисунок 4.2 – Морфометрические характеристики изучаемой территории:

а) плотность ребер рельефа; б) средние отклонения высот от трендовой поверхности; в) средние углы падения склонов; г) границы геологических тел, с карты масштаба 1 : 500 000

Однако для того, чтобы проследить особенности неотектонического этапа деформаций территории, необходимо найти способ предварительно устранить влияние древнеструктурных факторов. При среднемасштабном неотектоническом районировании территорий морфометрический анализ эффективен для создания схем блочной делимости путем реконструкции высотных уровней древнего пенеплена. Методика апробирована на примере Чуйской межгорной котловины и ее обрамления. На рисунке 4.3 приведен пример схемы блочной делимости территории Чуйской межгорной котловины и ее обрамления.

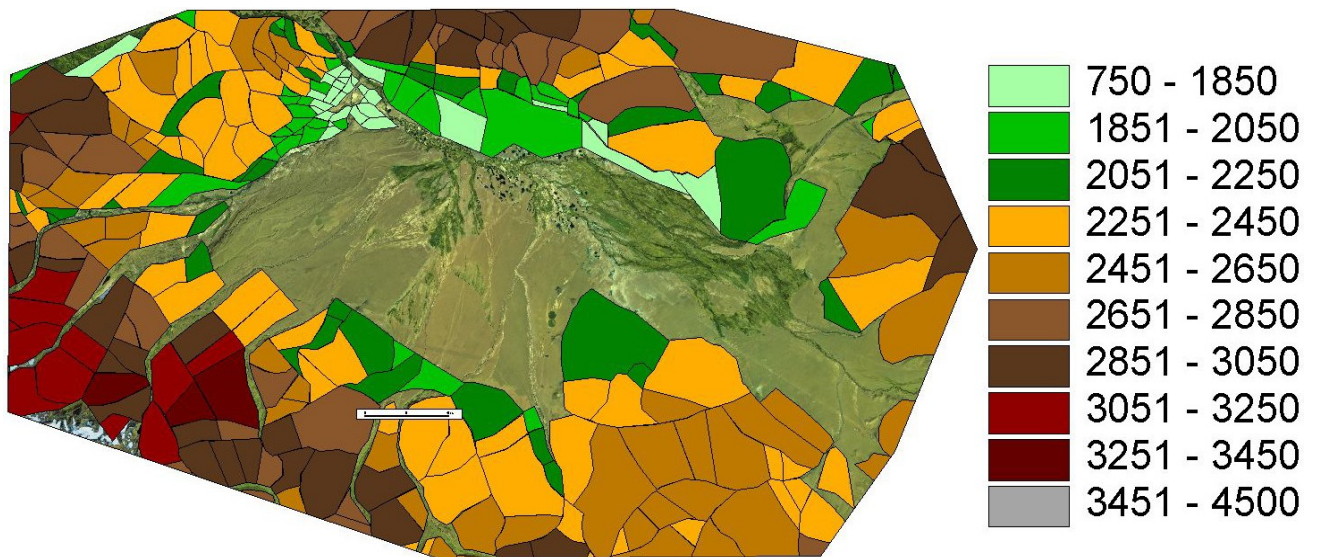


Рисунок 4.3 – Схема блочной делимости обрамления
Чуйской межгорной котловины

Чуйская межгорная впадина является полурамповой структурой, представляя собой относительно опущенный блок, обрамленный блоками, испытавшими воздымание. Территория опущенного блока является бассейном седиментации кайнозойских осадков, скрывающих его внутреннюю неотектоническую структуру. Территория Чуйской котловины от днища и до обрамляющих ее водоразделов в неотектоническом плане сложена группировками блоков различного размера и различного высотного положения. Эти блоки формируют

серии площадок, отграниченных друг от друга уступами различной выраженности. Разновысотное положение площадок, покрытых неогеновыми отложениями, а также площадок, представляющих собой древние поверхности выравнивания, позволяет говорить о значительных вертикальных смещениях в четвертичном периоде, имевших разную амплитуду для морфоструктурных объектов разного иерархического уровня. Очевидным представляется наличие структур дробления, зон сжатия и растяжения. Достоверно судить об амплитуде и направлении горизонтальных смещений труднее. Тем не менее, на некоторых участках (в частности, на южном склоне Курайского хребта) фиксируются сдвиговые деформации.

На региональном уровне кайнозойский структурный план отражается на монокомпонентных и синтетических (комплексных) морфометрических сетках в виде морфотектонических ареалов и морфотектонических поясов, различающихся плановой конфигурацией и структурной упорядоченностью образующих их элементов: в состав ареалов входят ареально-блоковые и поясно-блоковые системы; в состав поясов – поясно-зональные системы блоков и реликты ареально-блоковых систем («массивы») [88].

Проявление геологических структур в рельефе обусловлено различной устойчивостью пород к процессам эрозии и денудации, а также наличием пространственно упорядоченных разломных зон. Закономерности общего позднекайнозойского тектонического устройства территории выявляются в следующей технологической последовательности: 1) типизация региональных неоднородностей рельефа на основе покомпонентного и поликомпонентного (комплексного) количественного морфометрического анализа; 2) обоснование классификационных легенд для типизации морфотектонических районов и подрайонов в связи с историко-геологической спецификой развития территории; 3) построение схем морфотектонического районирования разного масштаба [28].

4.3 Картографирование и мониторинг процессов аридизации на юге Западно-Сибирской равнины

Юг Западной Сибири, по данным климатического мониторинга [67], относится к территориям, для которых характерен постепенный рост засушливости и экстремальности климата. Для прогноза ответной реакции ландшафтов на изменения климата необходимы их своевременное выявление и последующий мониторинг. Наиболее простым для этих целей является индикаторный метод, традиционно используемый при географических, гидрогеологических и ботанических исследованиях [13]. Он позволяет на примере отдельных объектов-индикаторов выявить определенные закономерности и отобразить их на картах. Поскольку на данной территории наибольшее распространение имеют бессточные котловины озер, то условия атмосферного увлажнения оказывают значительное влияние на уровень воды в них. Поэтому озера были выбраны в качестве индикаторов процессов аридизации.

Разработка методики картографирования и мониторинга индикаторов опустынивания была начата в рамках работы по интеграционному проекту на полигоне «озеро Баган», в состав которого входили озеро и прилегающая к нему территория с естественным растительным покровом. Эти исследования (2001–2008 гг.) были направлены на составление схемы изменений структуры природно-территориальных комплексов (ПТК) в результате высыхания озера и включали в себя сопряженное изучение геолого-геоморфологического каркаса, почв и растительности методом закладки профилей и картографирования, описание с координатной привязкой, а также сезонные (с начала мая по конец сентября) и годовые наблюдения за уровнем воды в озере методом закладки реперов [40].

Дальнейшие исследования включали изучение четырех полигонов, расположенных с севера на юг, основанное на предварительном выводе о том, что закономерности в проявлениях процессов аридизации имеют субмеридиональный

характер [44]. В ходе работы выявлено, что озеро Кулундинское реагирует на изменения климата не так, как другие озера: часто изменения в нем находятся в противофазе по отношению к другими озерам. По-видимому, это связано с его размерами, что обуславливает специфику местного климата. Возник вопрос: насколько часто возникают такие местные отклонения от общей закономерности? Кроме того, стало очевидным, что при выборе полигонов для изучения динамики процессов увлажнения/иссушения следует больше уделять внимание подбору полигонов со сходной геоморфологической и гидрологической ситуацией. Поэтому появилась потребность сделать региональную оценку плотности озер и проанализировать геолого-геоморфологическую основу ландшафтов, для того чтобы оценить адекватность выбора полигонов для мониторинга.

На цифровой модели SRTM (разрешение 90×60 м было преобразовано к размеру пикселя 60×60 м) отчетливо проявлены современные озера, которые зачастую располагаются в котловинах гораздо большего размера (позднечетвертично-голоценового времени). По отношению величины современных озер к древним озерным поверхностям, в которых они расположены, можно судить о максимальных периодах увлажнения в голоцене.

Котловины современных озер хорошо дешифрируются на морфометрических показателях как плоские участки. На схеме углов падения склонов (уклон) озера имеют нулевые значения параметра (рисунок 4.4, *а*), а на схеме экспозиции склонов – значения параметра -1 (рисунок 4.4, *б*). Указанный диапазон значений углов выделен с помощью калькулятора растров и пересохранен как растр озер. Затем растр сконвертирован в вектор, из которого наиболее мелкие объекты отфильтровывались по площади.

Однако в данном случае выделяется уровень современного водного зеркала озера. Более обширная котловина, в которой оно расположено, соответствует максимальному палеоуровню воды в нем. На рисунке 4.5 видно, что котловины расположены на разных высотных отметках. Соответственно, для их выделения необходимо использовать относительные морфометрические показатели, такие

как, например, диапазон углов и отклонения высот от тренда (см. рисунок 4.5). На рисунке 4.5, *а* показано, как интервал значений 0–1,5 показателя диапазона углов (разница между максимальным и минимальным значениями угла в скользящем окне 5×5 пикселей) соответствует озерным котловинам. На рисунке 4.5, *б* представлены отклонения высот от тренда поверхности. В данном случае котловины выделяются по отрицательным значениям. Таким образом, озерные котловины (в том числе приречные озеровидные расширения) были выделены на основе статистического распределения значений отклонения высот от тренда.

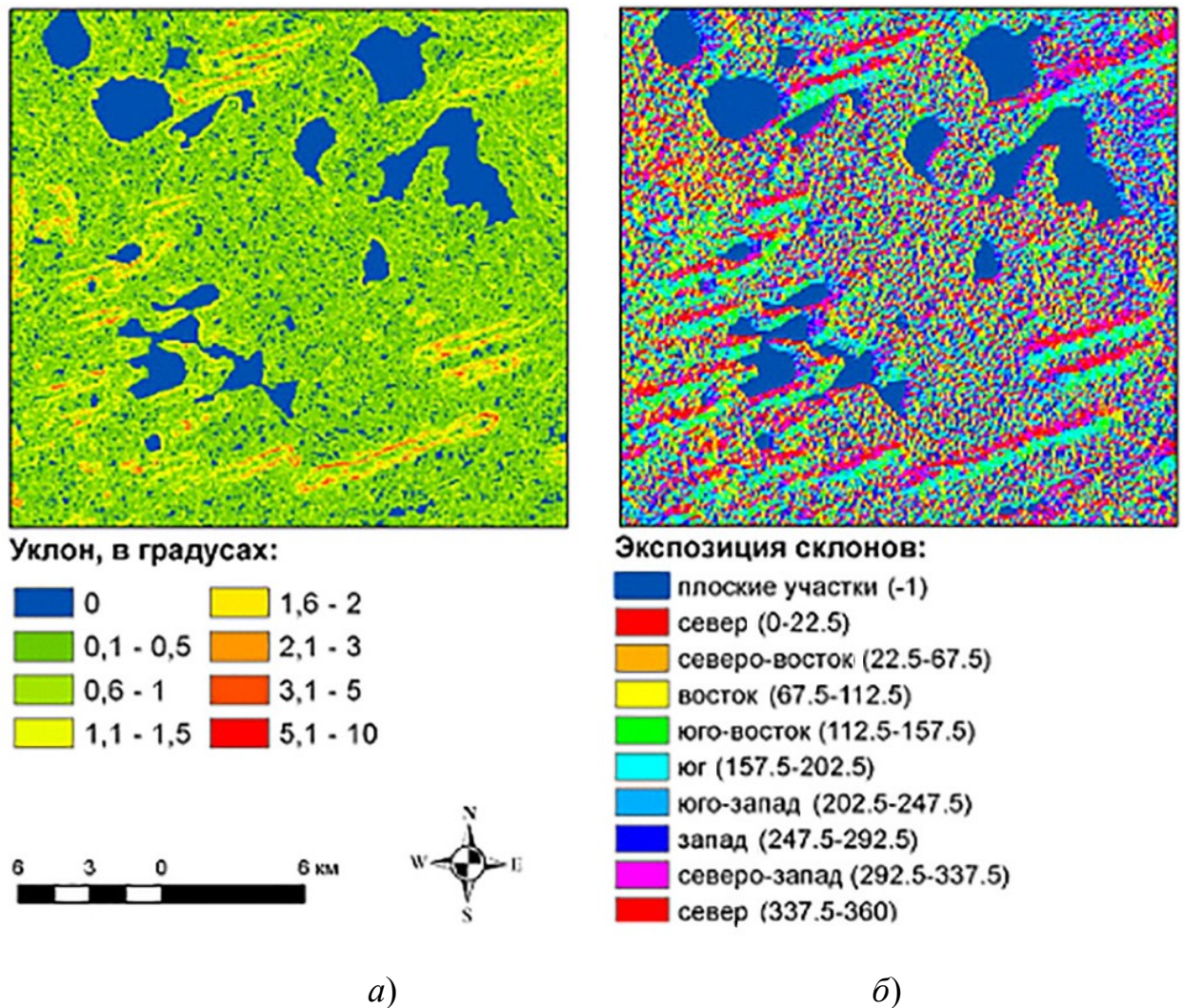


Рисунок 4.4 – Озера: *а*) схема уклона склонов; *б*) схема экспозиции склонов

Помимо озер, полученных с ЦМР, были сняты озера с топокарт масштаба 1 : 200 000 1970-х гг. По полученным векторам строились плотностные карты, оконтуривающие области их распространения. Показатели нормированы на 100 % заполнения окна и разбиты на интервалы на основе анализа гистограмм распределения значений.

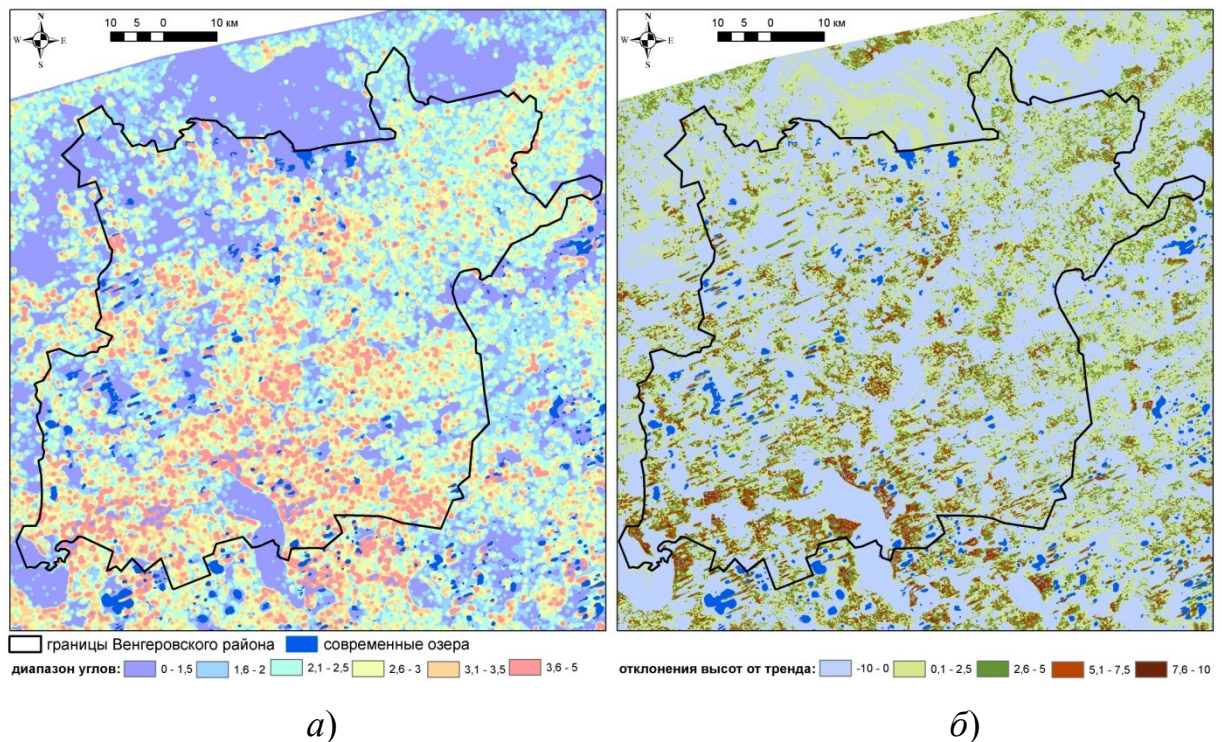


Рисунок 4.5 – Морфометрические показатели: *a)* диапазон углов; *б)* отклонения высот от тренда

По результатам сравнительного анализа был сделан вывод, что на Барабинской равнине в голоцене озера имели более обширное распространение. Ими было занято около 30–40 % территории (рисунок 4.6, *a)*, при этом озеро Чаны имело гораздо большие размеры, а расширения р. Оми переходили в режим озера. В настоящее время территория, прилегающая к Прииртышскому валу, занята в основном высохшими озерными котловинами, в то время как на остальной территории днища палеоозер заболочены. Между Барабинской и Кулундинской равнинами наблюдаются локальные повышения в виде продолжений увалов, где заозерен-

ность меньше, чем в межувальных понижениях. Закономерность распространения озерных котловин на территории Кулунды обладает другой спецификой: она как бы обрамлена остаточными озерами по краям, а ее центральная часть занята озерами в меньшей степени. Сопоставление между разновременными озерными поверхностями показано на рисунке 4.6.

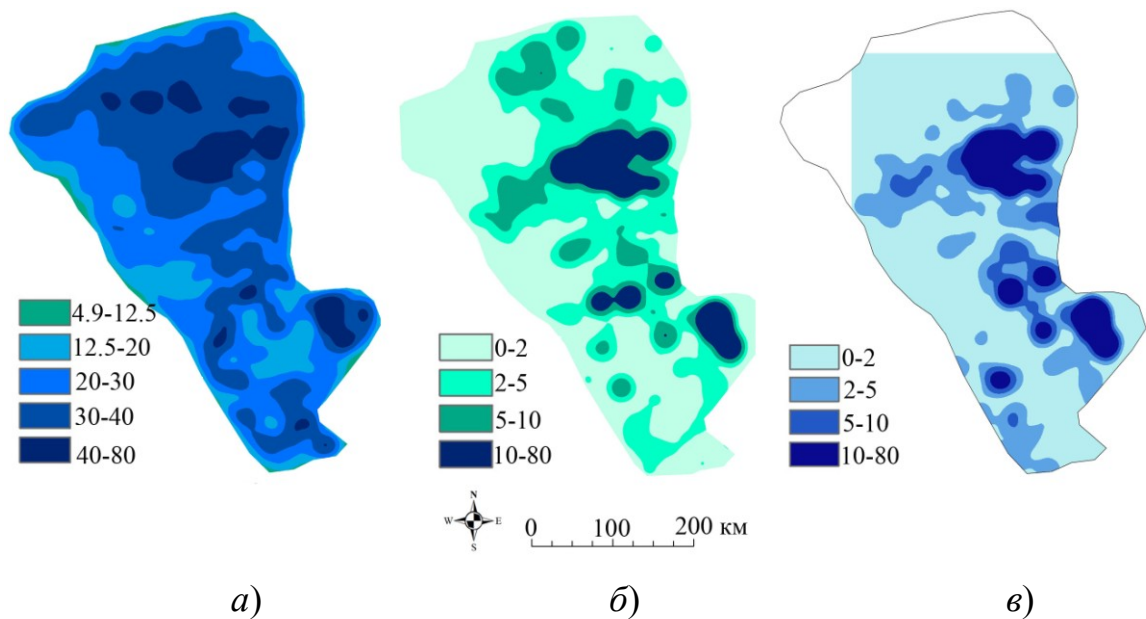


Рисунок 4.6 – Схемы густоты распространения: *а)* озерных поверхностей, полученных на основе морфометрического анализа ЦМР; *б)* озер, снятых с топокарт (1970–1980-х гг.); *в)* озер, полученных по космоснимкам MODIS (2001 г.)

Районирование по степени современной заозеренности показало, что площади палеозер на порядок превышают площади современных озер (см. рисунок 4.6, *б*, *в*) [139]. Анализ значений густоты их распространения показал, что они являются несопоставимыми, поскольку в настоящее время озерами занято не более 10 % территории, в то время как в голоцене этот показатель доходил до 20–40 %. Наибольшие скопления современных озер располагаются вблизи крупных палеокотловин таких озер, как Чаны, Кулундинское и др. Остальные палеозера распределены по территории мозаично, и в динамике их площадей не прослеживается субмеридиональной зависимости.

Полученная схема палеоозер хорошо согласуется с картами четвертичных отложений государственного геологического картирования масштаба 1 : 200 000 (рисунок 4.7), где им соответствуют озерные и болотные отложения позднечетвертично-голоценового времени.

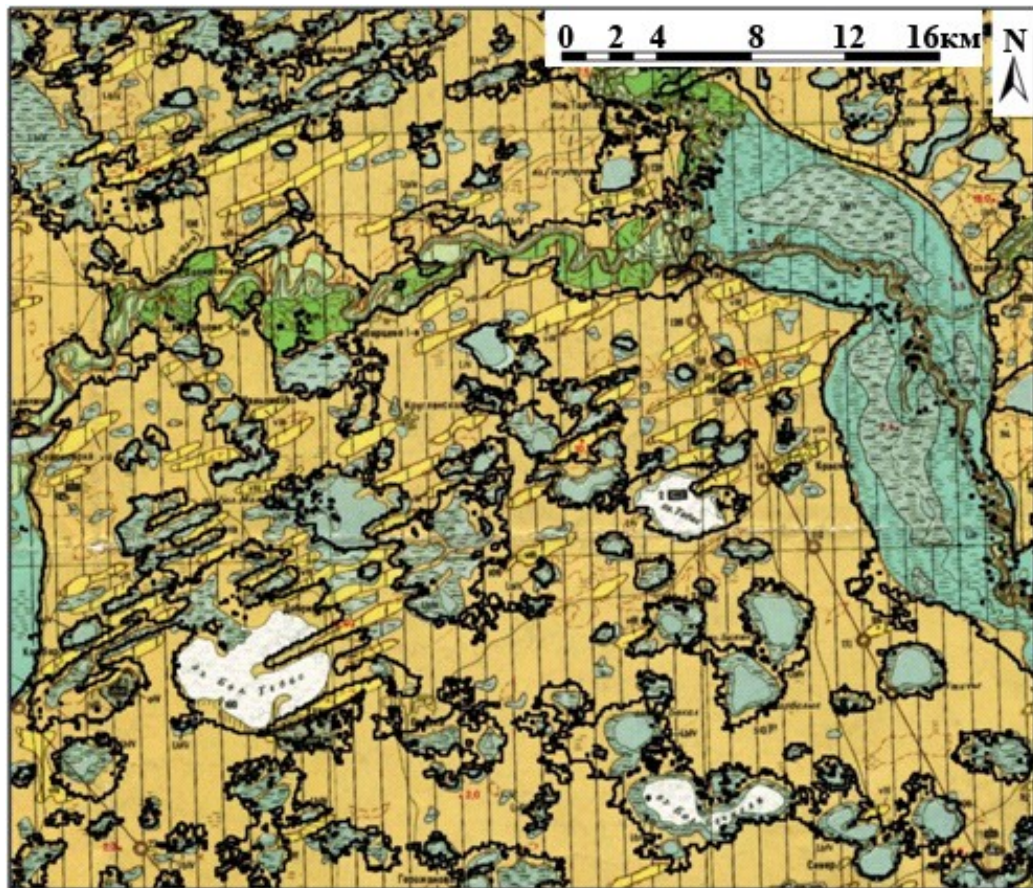


Рисунок 4.7 – Фрагмент карты четвертичных отложений с наложенными векторными контурами палеоозер (лист N-43-V)

Сравнение озер, оцифрованных с топокарт середины XX в. (1970–1980-х гг.), с озерами, выделенными по более поздним данным MODIS (2001 г.), показывает, что значительные изменения произошли и за последние 40–50 лет. На рисунке 4.8 видно, что в некоторых местах наблюдается полное исчезновение мелких озер. Кроме того, фиксируется уменьшение площадей крупных озер (к примеру, часть озера Чаны, озеро Большой Ажбулат и др.). В свою очередь, контуры некоторых

озер практически совпадают, есть лишь небольшие различия в краевых частях (озера Кулундинское, Большое Яровое и др.) [44].

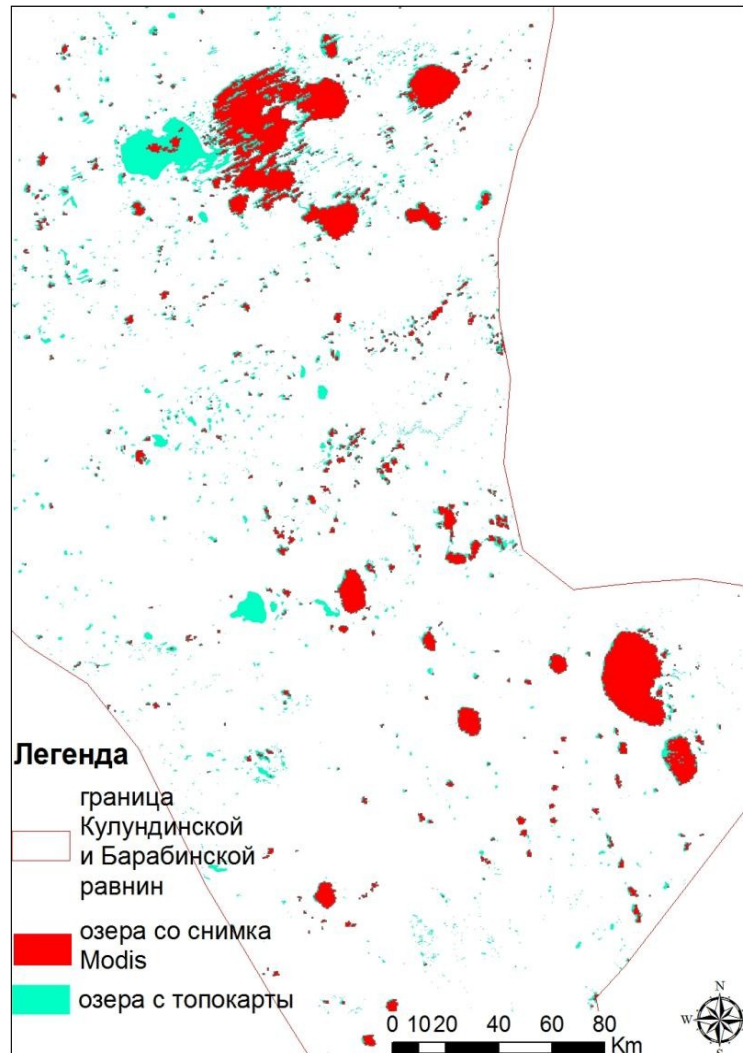


Рисунок 4.8 – Сравнение контуров озер с топокарт и со снимка MODIS

Таким образом, данные мониторинга подтвердили развитие процессов аридизации в лесостепных и степных районах юга Западной Сибири. Сравнительный анализ заозеренности на разные временные отрезки показал, что региональная закономерность пространственного распределения этих процессов может описываться моделью мозаично-очагового преобразования ландшафтов практически на всей территории [111, 139].

Выводы по четвертому разделу

Первый уровень полноты определенности морфогенетических данных характеризуется наименее четким представлением о геоморфометрических характеристиках и о происхождении рельефа изучаемой территории. Такая ситуация наиболее часто встречается в конкретных задачах прогноза в смежных с геоморфологией областях исследования, когда необходимо выделять не формы рельефа и их комплексы, а районы, удовлетворяющие определенным геоморфологическим условиям, значимым для решения какой-либо тематической задачи. В данном случае геоморфометрические характеристики используются для дифференциации географического пространства.

Процедура геоинформационного моделирования районов управляется пользователем. При этом критерии разрабатываются исходя из цели исследования. Такая методика позволяет решать различные тематические задачи, что проиллюстрировано на нескольких примерах.

5 ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ И МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ РЕЛЬЕФА ПО МОРФОМЕТРИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Существуют ситуации, при которых данные о морфогенетических характеристиках рельефа представлены достаточно полно, однако разделение рельефа на таксономические единицы, более дробные, чем тип рельефа (формы и элементы рельефа), не представляется возможным. Например, пространственное разрешение цифровых моделей рельефа является недостаточным для дробной сегментации на формы рельефа (которую невозможно проводить на субпиксельном уровне). Также это может быть обусловлено геоморфологической спецификой района. В таком случае однородные типы рельефа могут выделяться на основе неуправляемых и управляемых классификаций, факторного анализа, нейронных сетей и т. п.

В качестве объекта для апробации выбран рельеф днища Чуйской межгорной котловины, длина которой с юго-востока на северо-запад достигает 80 км, а ширина в субмеридиональном направлении – 36 км. С северной стороны котловину ограничивает Курайский хребет, с юга – Южно-Чуйский хребет и плато Сайлюгем. Западный борт представлен отрогом Северо-Чуйского хребта и Чаган-Узунским горным массивом, восточный – Тапдуайрским горным массивом и северо-восточным окончанием Сайлюгемского плато. Днище имеет слабо вогнутую форму. Самые низменные участки находятся в северо-западной части котловины. К востоку и югу происходит пологое воздымание.

Чуйская степь является детально изученной в геоморфологическом отношении. Данные по рельефу, тектонике и кайнозойским отложениям наиболее полно отражены в работе Е. В. Девяткина [27]. Им было выделено три оледенения: среднеледниковое (максимальное) и два верхнеледниковых (постмаксимальных). Однако неоднократность оледенений и подпруживания Чуйской котловины отмечалась и другими авторами. Общий обзор геолого-геоморфологических исследований этого района дан в [39]. Центральная часть котловины занята лимно-гляциальной равниной, которая местами расчленена аллювиальными и флюви-

гляциальными образованиями. Обрамляется днище котловины слившимися делювиально-пролювиальными шлейфами горных подножий. На юго-восточной окраине распространены гляциокомплексы. На предварительном этапе на основе литературных источников, данных полевых наблюдений и визуального анализа по ЦМР и снимкам Landsat было выявлено 10 однородных типов рельефа: гляциальный ложбинно-грядовый, эрозионный ложбинно-овражный, делювиально-пролювиальный, озерный на морене, озерный на алевропесках, озерный с барами, аллювиальный долины р. Чуи, аллювиальный притоков, аллювиальный врезанных долин, термокарстовый.

Все указанные типы визуально дешифрируются как по ЦМР, так и по космоснимкам. Построенные по ЦМР профили с помощью 3D Analyst позволяют наглядно продемонстрировать геоморфологические особенности территории.

Гляциальный ложбинно-грядовый тип рельефа представляет собой чередование моренных гряд и ложбин. На рисунке 5.1 представлен профиль, построенный по ЦМР, отображающийся поверх снимка Landsat. Он пересекает две гряды высотой около 25–30 м и шириной около 500 м.

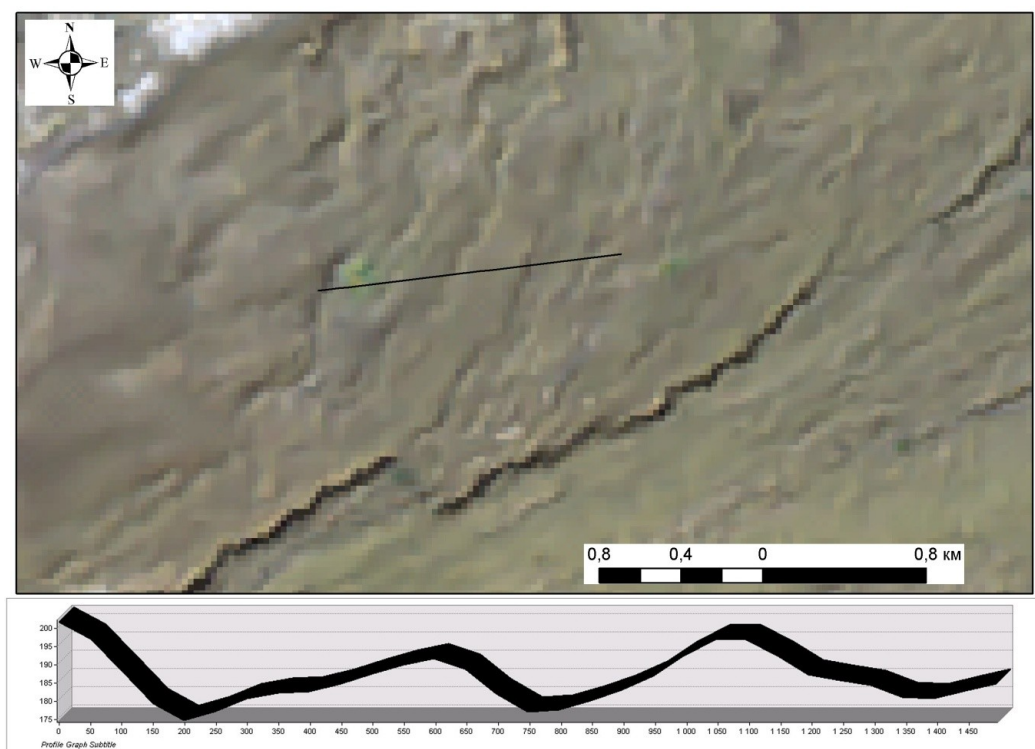


Рисунок 5.1 – Профиль гляциального ложбинно-грядового типа рельефа

Границами служат озерные абразионные уступы, хорошо выделяющиеся визуально как на снимках Landsat, так и на ЦМР (рисунок 5.2).

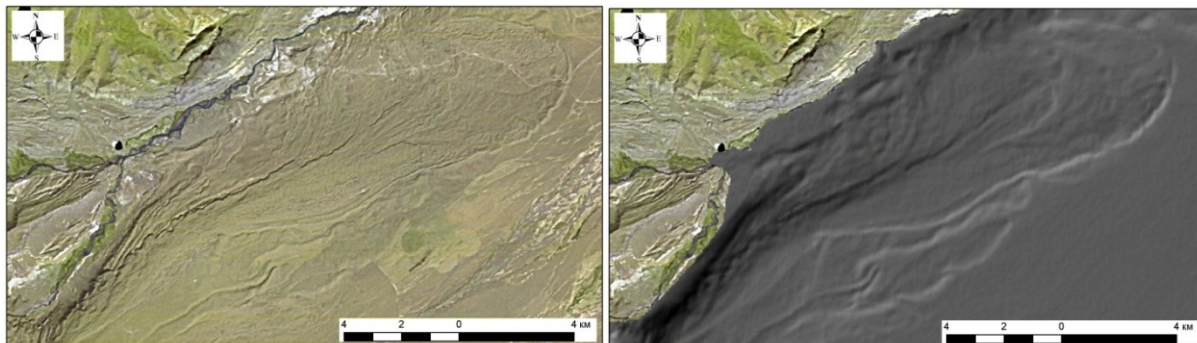


Рисунок 5.2 – Границы гляциального ложбинно-грядового типа рельефа

Восточнее гляциального типа рельефа расположен *озерный на морене* (рисунок 5.3). Он представляет собой сглаженно-денудированную поверхность среднечетвертичной морены, постепенно закрываемую валунно-галечным и алевропесчаным наносами. На ней развиты каменистые степи.

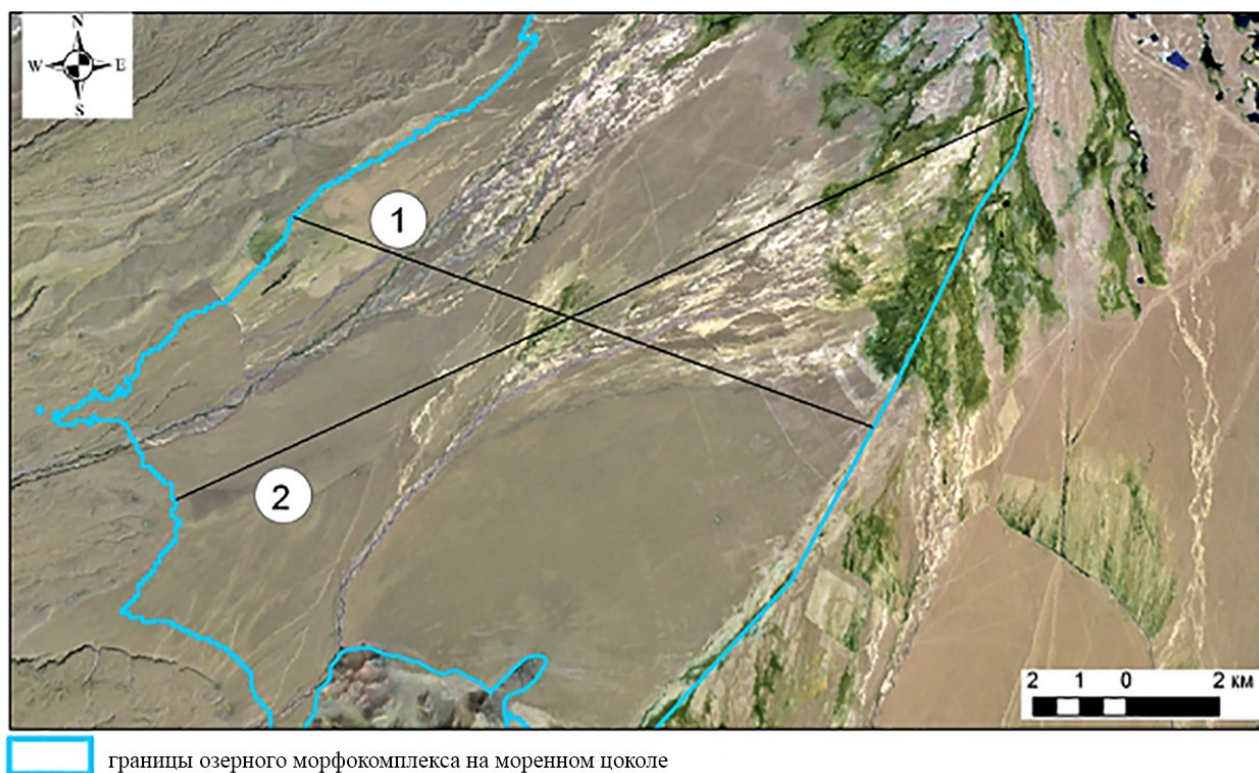


Рисунок 5.3 – Озерный тип рельефа на моренном цоколе

Было построено два профиля по направлению поднятия этого крупного неотектонического сегмента котловины (рисунок 5.4). Первый профиль показывает небольшое поднятие с востока на запад: на протяженности около 13 км высоты увеличиваются на 100 м. Второй профиль показывает нарастание высот по направлению с северо-востока на юго-запад. В этом направлении высоты увеличиваются на 300 м на протяженности 20 км. Оба профиля пересекают несколько раз притоки р. Чуи, однако на профилях это не отражается.

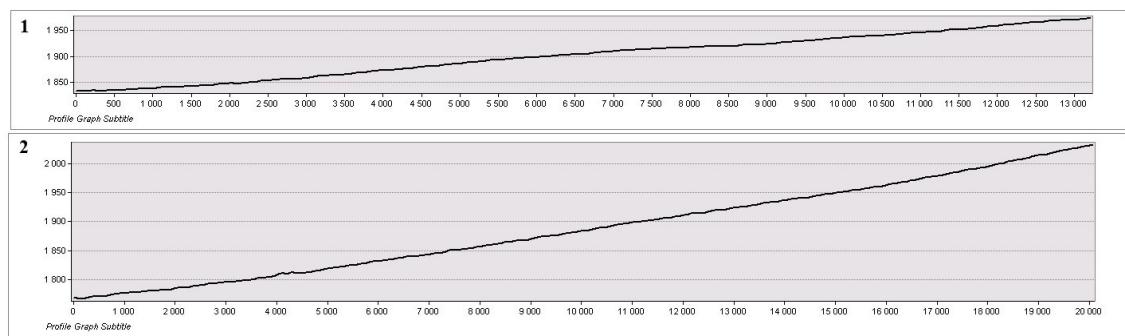


Рисунок 5.4 – Профили озерного типа рельефа на моренном цоколе

Рядом расположен *озерный тип рельефа на алевропесчаном основании* – выровненная поверхность с большим слоем алевропесков с включением дресвы и щебня (рисунок 5.5). Распространены степные ландшафты.

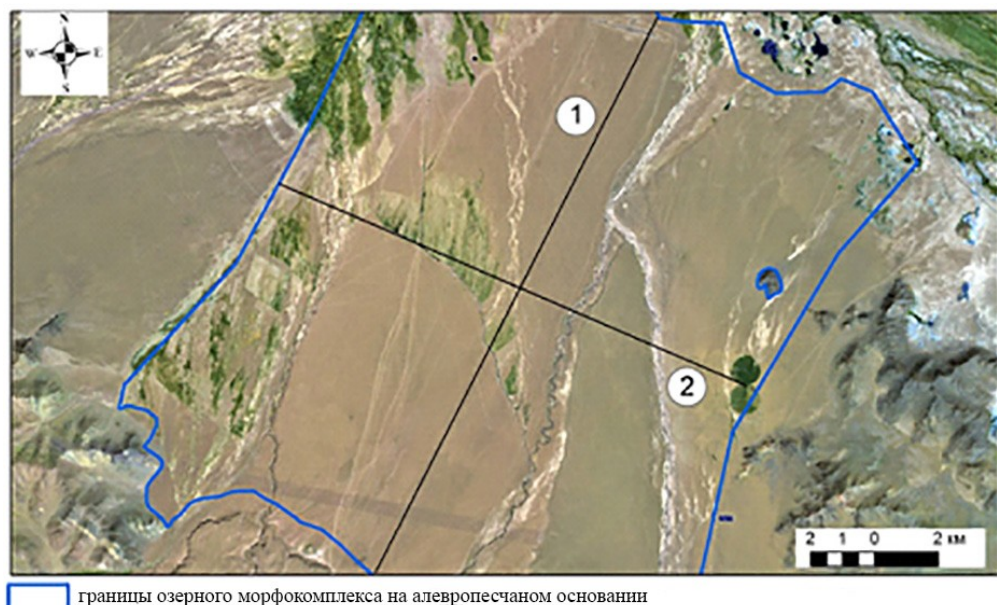


Рисунок 5.5 – Озерный тип рельефа на алевропесчаном основании

Вследствие айсбергового разноса по акватории позднеплейстоценового озера здесь присутствуют эрратические глыбы (рисунок 5.6) [39].



Рисунок 5.6 – Эрратические обломки айсбергового разноса

Особенностью микрорельефа данного типа рельефа является наличие уступов, выработанных волноприбойной деятельностью позднеплейстоценового озера в среднеплейстоценовых моренах (рисунок 5.7) [39].



Рисунок 5.7 – Озерные уступы в среднеплейстоценовых моренах р. Тархаты

На профилях (рисунок 5.8) видно, что высоты этой территории в меньшей степени увеличиваются к южному борту котловины (около 60 м), и чуть больше – по направлению к Сайлюгемскому плато (около 100 м). На профиле 1 видно, как проявляются на ЦМР уступы, о которых говорилось выше, и один из притоков р. Чуи.

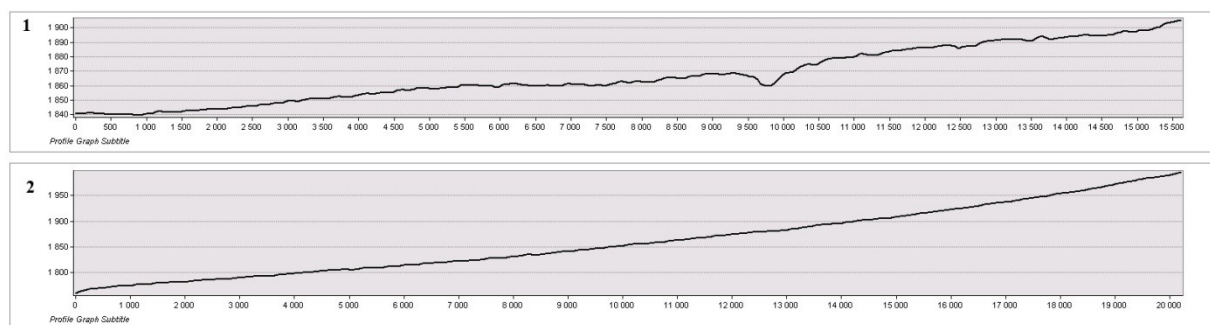


Рисунок 5.8 – Профили озерного типа рельефа на алевропесчаном основании

Восточнее Сайлюгемского плато расположен *озерный тип рельефа с барами* (рисунок 5.9). Выровненная поверхность с серией асимметричных гряд – это бывшее дно позднечетвертичного озера, а гряды расположены параллельно палеоберегу. Озерные бары являются следствием интенсивности придонной денудационно-аккумулятивной деятельности последнего палеоозера. Бары сложены галечниками, гравийниками и песками [7].

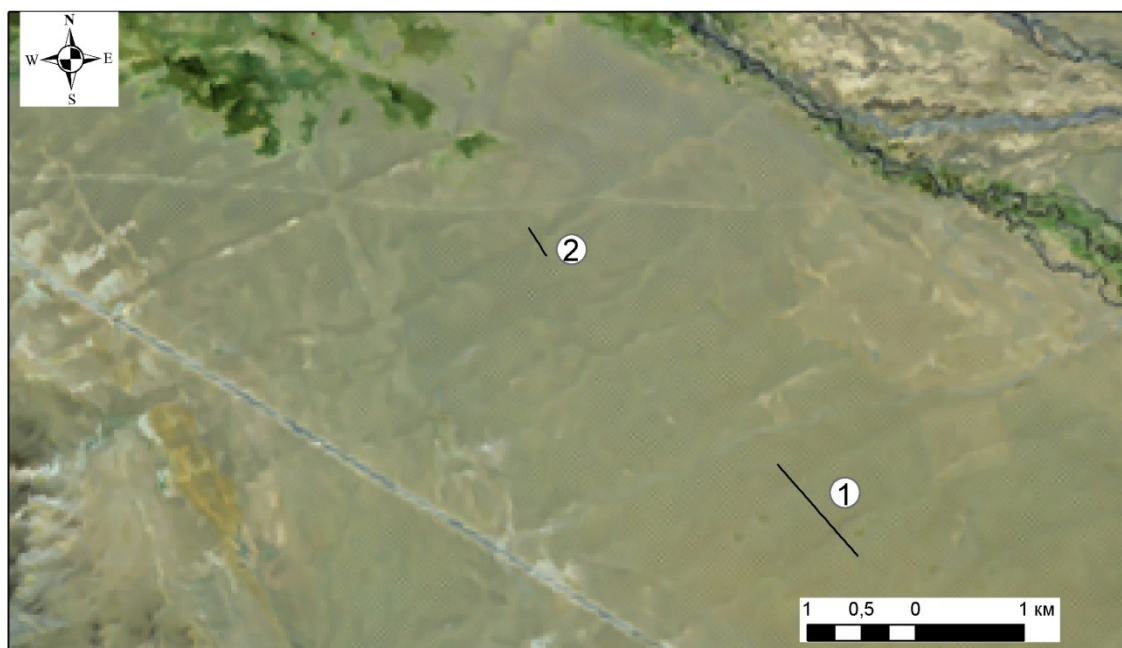


Рисунок 5.9 – Озерный тип рельефа с барами

Озерные бары отмечались еще в [19, с. 64]: «Широкие (200–300 м в поперечнике) пологие увалы меридионального простирания и слабо асимметричного

профиля с более пологим западным склоном, напоминающие собой в совокупности гигантскую рябь». На рисунке 5.10 показаны два профиля. Первый охватывает два увала, второй – более крупно показывает в разрезе один из них. В поперечнике они, как упомянуто выше, около 200–300 м, высотой 2–4 м.

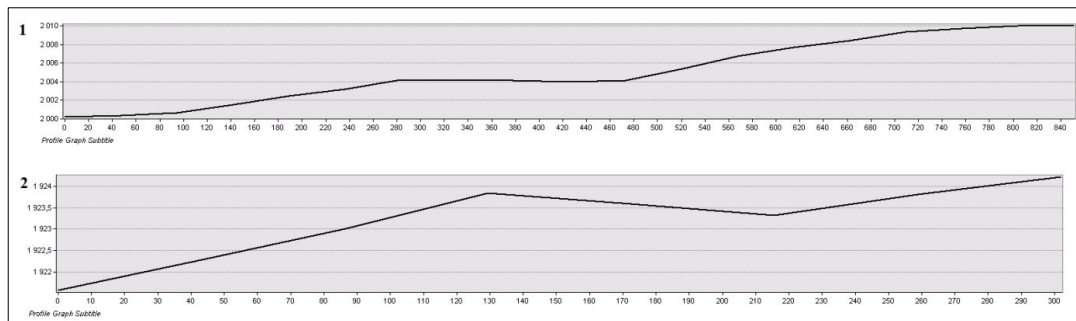


Рисунок 5.10 – Профили озерных баров

Севернее озерной равнины, к пойме р. Чуи, примыкает *термокарстовый тип рельефа*. Он состоит из озерных котловин. На профиле (рисунок 5.11) показана одна из них: 600 м в поперечнике и 4 м глубиной до зеркала воды. Термокарстовые озера возникают в результате таяния подземных инъекционных льдов, которые, в свою очередь, сформировались в погребенном аллювии р. Чуи.

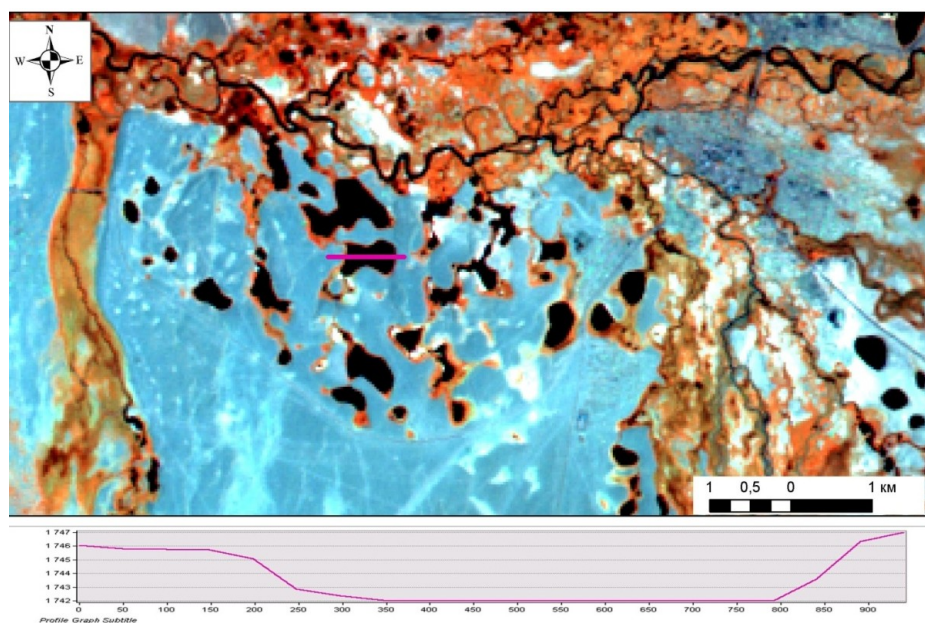


Рисунок 5.11 – Профиль термокарстового типа рельефа

Аллювиальный тип рельефа многорукавной долины р. Чуи занимает собой наиболее низинную часть Чуйской котловины в северной части, а в юго-восточной части река, обтекая ромбообразный грабен, распадается на множество небольших рукавов (рисунок 5.12). Протоки р. Чуи слабо выражены на ЦМР, а на снимке Landsat подчеркиваются растительностью (в ложных тонах она показана красным цветом).

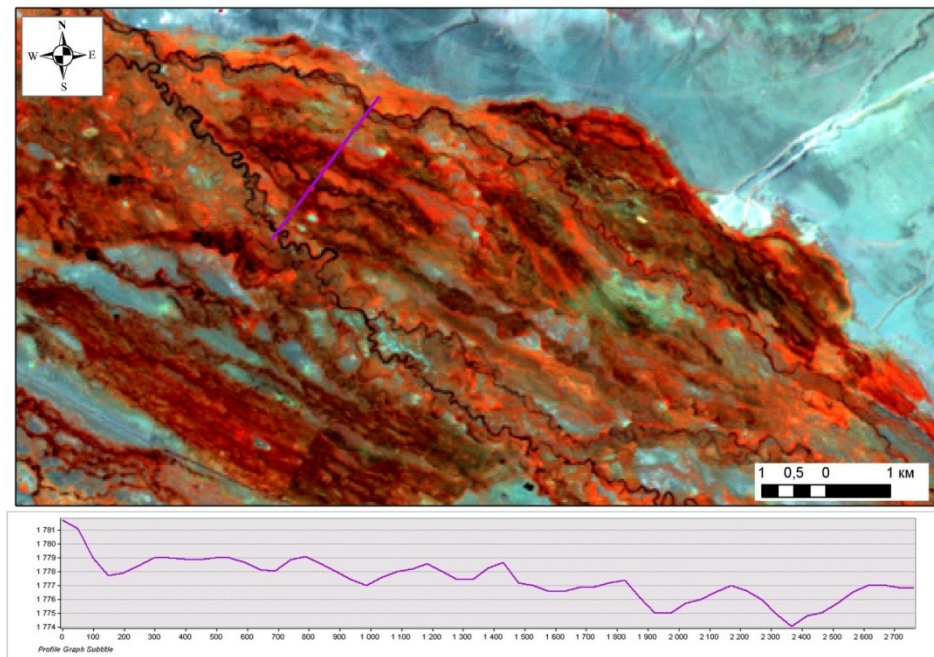


Рисунок 5.12 – Профиль многорукавной долины р. Чуи

Аллювиальный тип рельефа притоков р. Чуи выделен не полностью. Это обусловлено тем, что притоки имеют неширокое русло (около 100 м). Сама долина притока может быть немного шире – около 500 м (рисунок 5.13). Притоки р. Чуи хорошо дешифрируются по космоснимкам. Некоторые притоки фиксируются и на ЦМР, однако из-за разрешения цифровой модели рельефа (90×90 м) и использования скользящего окна на относительных показателях распознаются плохо. Таким образом, аллювиальный тип рельефа притоков выделен в результате монопараметрической классификации по углу.

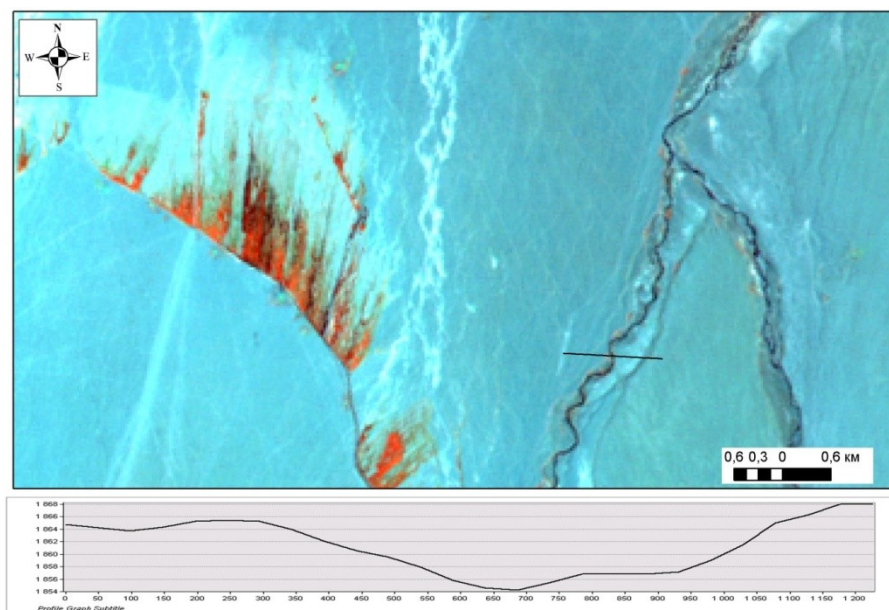


Рисунок 5.13 – Аллювиальный тип рельефа притоков р. Чуи

Эрозионный ложбинно-овражный – это достаточно разнообразный тип рельефа, имеет некоторую специфику в разных местах (рисунок 5.14).

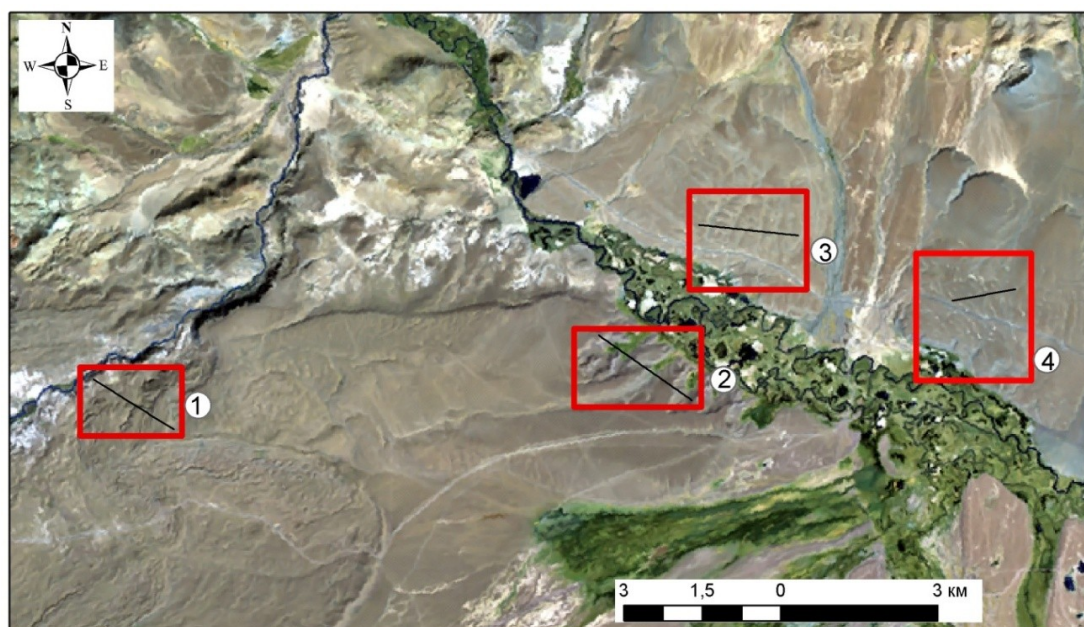


Рисунок 5.14 – Эрозионный ложбинно-овражный тип рельефа

В этот тип вошел, в том числе, и грядовый рельеф нижней части слабонаклонной предгорной равнины на абсолютных отметках 1 750–1 850 м (рису-

нок 5.15, профили 3 и 4), представляющий собой парагенетическую ассоциацию отложений водокаменных и грязекаменных потоков [38]. Поскольку гряды расчленены во многих местах промоинами и оврагами, они были отнесены к эрозионному ложбинно-овражному типу рельефа.

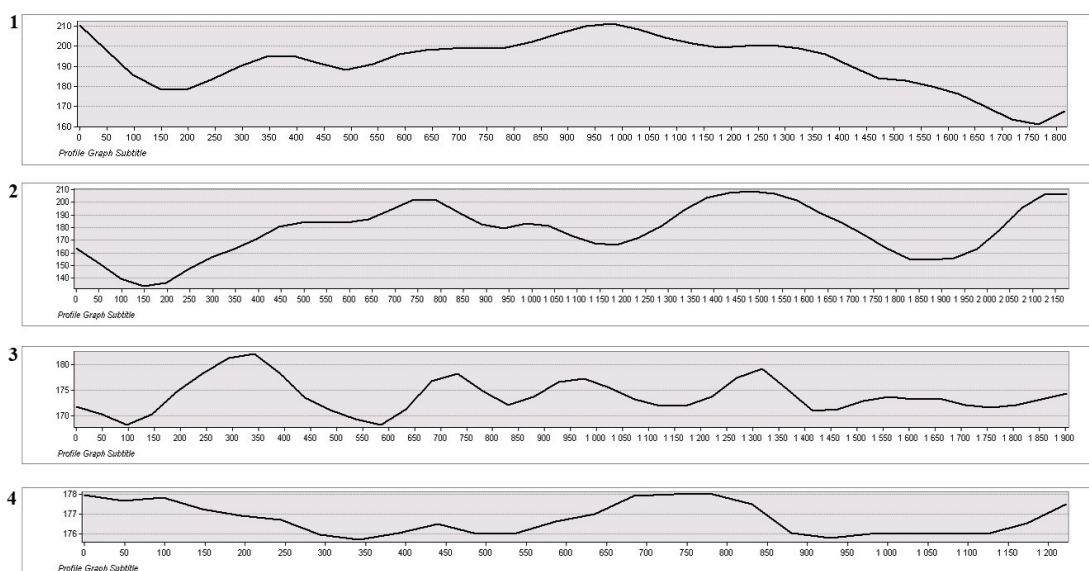


Рисунок 5.15 – Профили эрозионного ложбинно-овражного типа рельефа

Делювиально-пролювиальный тип рельефа примыкает к горному обрамлению и кайнозойским останцам, где образуются мощные делювиально-пролювиальные шлейфы. Этот тип рельефа представляет собой выровненные наклонные поверхности с резким переходом к равнинной части, что хорошо фиксируется на ЦМР (рисунок 5.16).

Морфометрические показатели. В нашем случае основой для построения морфометрических показателей послужила цифровая модель рельефа SRTM с разрешением 90×60 м, приведенная к размеру пикселя 90×90 м. Очевидно, что при указанной величине пикселя ЦМР какие-то формы земной поверхности могут полностью попадать в него, а какие-то лишь частично. При построении морфометрических показателей для выделения гомогенных типов рельефа подбирается такой размер скользящего окна, чтобы в него попадали основные сочетания форм земной поверхности. На рисунке 5.17 показан пример для участка с развитым

термокарстовым рельефом в Чуйской котловине. Экспериментальным путем был подобран размер окна 1,26 км. В окно указанного размера в среднем попадает несколько термокарстовых озер.

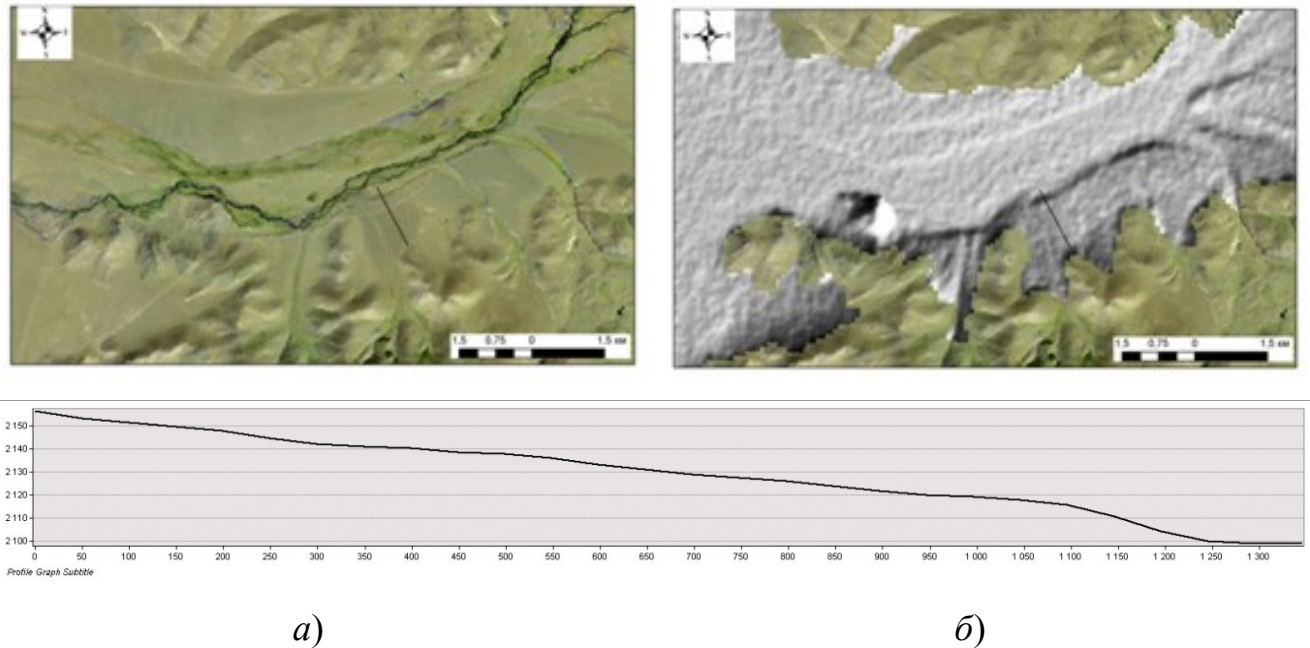


Рисунок 5.16 – Деллювиально-пролювиальный тип рельефа: *а)* снимок Landsat; *б)* ЦМР SRTM

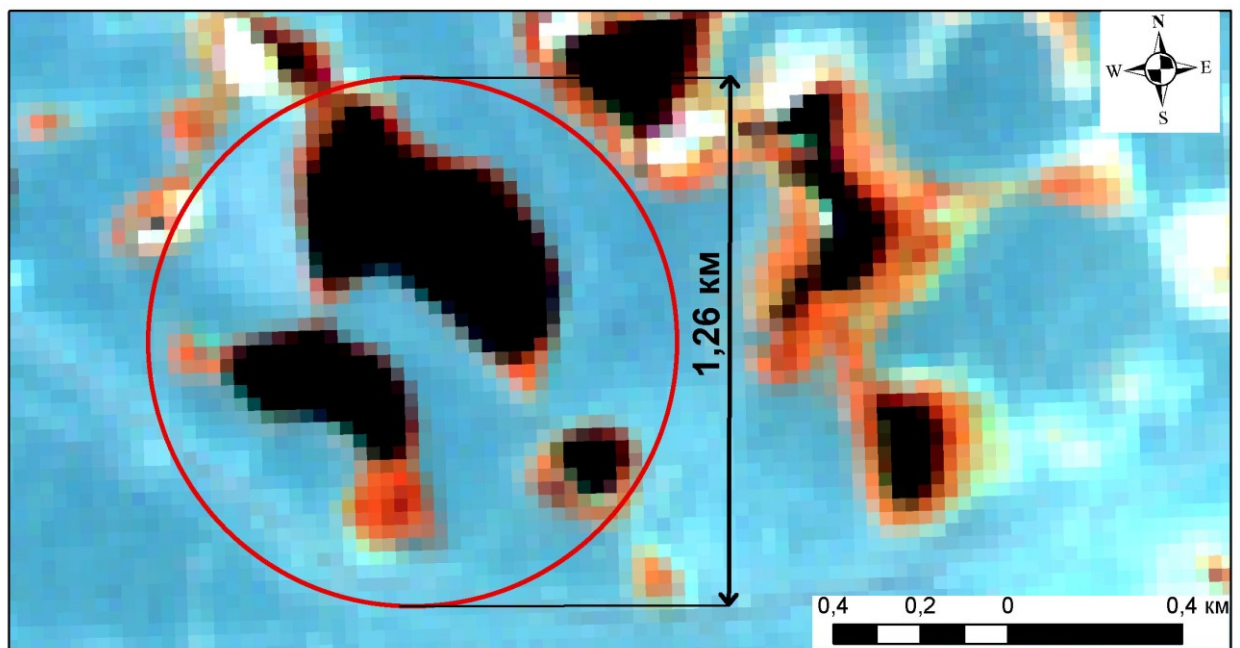


Рисунок 5.17 – Термокарстовые озера на снимке Landsat

С помощью такого скользящего окна можно получить усредненные морфометрические показатели типов рельефа, а не составляющих их форм. Такой подход опирается на предположение о том, что устойчивым сочетаниям форм, образующим характерные типы рельефа, соответствуют определенные интервалы значений морфометрических параметров.

Очевидно, что в горной области морфометрические показатели даже в районе выровненного днища котловины будут отражать два фактора. Прежде всего, на структуру рельефа будет влиять неотектоническая история, т. е. характер новейших движений тектонических блоков. Вторым фактором рельефообразования будет являться специфика экзогенных процессов разного генезиса. Для картографирования типов рельефа было необходимо выявить вклад каждого из факторов в морфометрические характеристики рельефа изучаемой территории.

Построены наиболее простые показатели, непосредственно вычисляемые из ЦМР:

- средние значения углов, высот, субмеридиональных и субширотных азимутальных характеристик;
- диапазоны субмеридиональных и субширотных азимутальных характеристик.

Далее в ходе работы наиболее эффективными для распознавания типов рельефа оказались морфометрические показатели: диапазоны углов и высот, а также средние значения субширотных и субмеридиональных азимутальных характеристик.

Проведен анализ морфометрических характеристик, их значения занесены в таблицу 5.1.

Из таблицы 5.1 видно, что диапазоны рассматриваемых признаков часто перекрываются у разных морфологических комплексов, что, собственно, и обуславливает трудность непосредственного распознавания изучаемых типов рельефа. Объекты, не различимые по одному из показателей, как правило, разделяются при сопряженном анализе пары или более показателей посредством кластерного ана-

лиза. Кроме того, повысить точность разделения позволяет предварительное районирование территории на неотектонические сегменты, а также разграничение пространства распознавания и количества выделяемых классов рельефа путем построения масок.

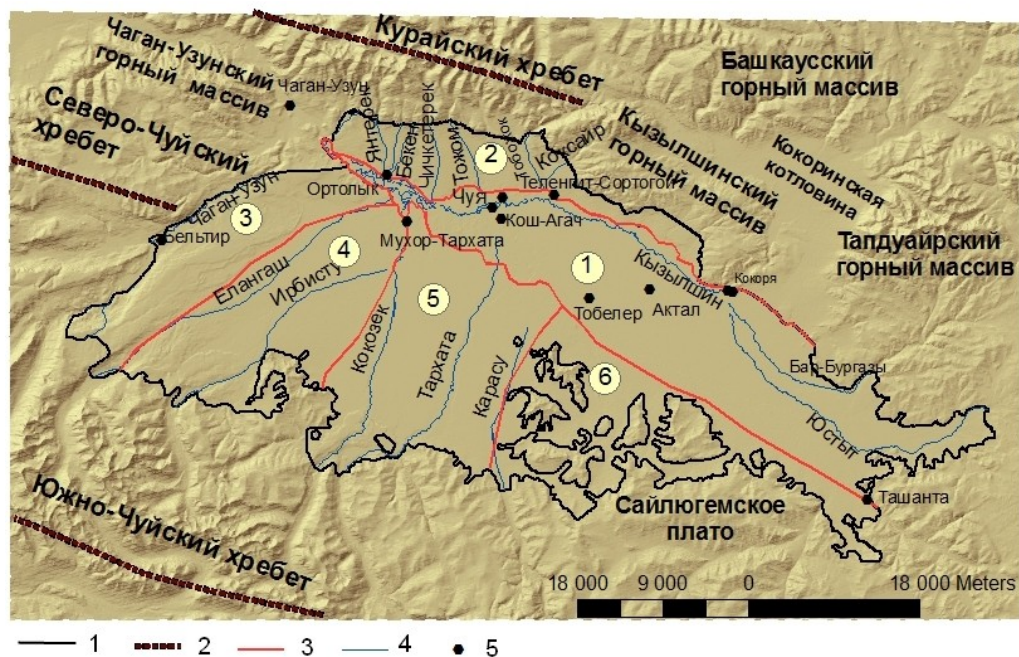
Таблица 5.1 – Значения морфометрических показателей для разных типов рельефа Чуйской котловины (нормированы на максимум)

Типы рельефа	Среднее значение высот	Среднее значение углов	Среднее значение субширотного аспекта	Среднее значение субмеридионального аспекта	Диапазон высот	Диапазон углов	Диапазон значений субширотного аспекта	Диапазон значений субмеридионального аспекта
Гляциальный ложбинно-грядовый	0,20–1,00	0,10–0,35	0,20–0,60	0,15–0,70	0,20–0,40	0,20–0,50	0,50–1,00	0,60–0,90
Эрозионный ложбинно-овражный	0,07–0,20	0,13–0,20	0,60–0,80	0,20–0,70	0,15–0,25	0,07–0,25	0,40–0,80	0,30–0,90
Делювиально-пролювиальный	0,20–0,50	0,06–0,16	0,20–1,00	0,00–1,00	0,07–0,20	0,05–0,15	0,20–1,00	0,30–1,00
Озерный на морене	0,04–0,40	0,03–0,06	0,05–0,25	0,20–0,50	0,04–0,07	0,02–0,03	0,25–0,40	0,25–0,55
Озерный на алевропесках	0,03–0,23	0,02–0,04	0,25–0,60	0,05–0,15	0,02–0,04	0,02–0,03	0,40–0,75	0,25–0,55
Озерный с барами	0,10–0,30	0,02–0,04	0,50–0,90	0,10–0,30	0,30–0,40	0,03–0,05	0,70–0,90	0,50–0,90
Аллювиальный долины р. Чуи	0,00–0,15	0,00–0,10	0,50–0,80	0,25–0,50	0,00–0,20	0,00–0,03	0,99–1,00	0,99–1,00
Аллювиальный притоков	0,00–0,30	0,30–0,40	0,00–1,00	0,20–0,40	0,05–0,08	0,04–0,10	0,70–0,90	0,50–0,70
Аллювиальный врезанных долин	0,60–1,00	0,30–1,00	0,30–0,85	0,10–0,80	0,40–1,00	0,40–1,00	0,30–0,70	0,20–0,30
Термокарстовый	0,00–0,03	0,03–0,05	0,40–0,60	0,30–0,70	0,03–0,05	0,05–0,12	0,96–1,0	0,70–1,00

Неотектоническое районирование. В значениях абсолютных высот, углов наклона и азимутальной экспозиции склонов («абсолютные» морфометрические показатели) проявляется прежде всего неотектоническая ситуация. Это обусловлено тем, что рельеф однотипного происхождения, расположенный на разновысотных поверхностях с разными уклонами и экспозициями, различается по этим абсолютным морфометрическим характеристикам. Таким образом, прежде чем

выделять генетические комплексы четвертичного рельефа, необходимо провести неотектоническое районирование по абсолютным морфометрическим показателям. В свою очередь, дальнейшее выделение типов рельефа, образованных разными экзогенными процессами, производилось преимущественно на основе относительных морфометрических показателей, представляющих собой средние значения и разницу максимальных и минимальных значений признака (диапазон значений), вычисляемых внутри скользящего окна.

При неотектоническом районировании выделяются несколько основных крупных геоморфологических сегментов (рисунок 5.18), которые предопределяли направление перераспределения обломочного материала от бортов к внутренней части впадины.



1 – граница днища Чуйской котловины; 2 – направления хребтов; 3 – границы геоморфологических сегментов; 4 – реки; 5 – поселки

Рисунок 5.18 – Схема неотектонического районирования Чуйской котловины

В качестве сегмента 1 можно считать Чуйско-Кызылшинско-Юстыд-Барбургазинское понижение, расширяющееся и постепенно воздымающееся с северо-запада на юго-восток. К северу расположен сегмент 2 – предгорная равнина, сла-

бо наклонная на юг. Эти сегменты сочленяются по достаточно резкому геоморфологическому перегибу. От западной окраины котловины примерно до левобережья р. Елангаш расположен сегмент 3, который осложнен ледниковыми формами рельефа и геоморфологическими уступами неотектонической природы. Его поверхность наклонена на север с вариациями углов падения $2-10^\circ$. К юго-востоку от него сегмент 4 днища Чуйской котловины четко отчленяется по линейной границе за счет выполаживания углов падения склонов (в среднем $0,5-2^\circ$) и смены азимутов падения на северо-восточное-восточное направление. Сегмент 5, не отличаясь от сегмента 4 по углам падения, тем не менее, четко отделяется по резкой смене азимутов падения на северо-северо-восточное направление. Сегмент 6 представляет собой фрагментированный на разнонаправленные грани останец Сайлюгемского плато, полого уходящий уступом под четвертичный чехол, закрывающий днище Чуйской котловины.

Помимо неотектонического районирования, повысить точность разделения позволяет сопряженный (многомерный) анализ. В качестве примера сравним на двумерной точечной диаграмме такие типы, как гляциальный ложбинно-грядовый и эрозионный ложбинно-овражный (рисунок 5.19).

На диаграмме видно, что использование средних высот и углов для разделения неэффективно, так как они пересекаются диапазонами значений, а также сами диапазоны значений распадаются на несколько поддиапазонов.

Использование относительных высот и углов является более эффективным, но полного разделения не дает (рисунок 5.20, *а, б*). С большей степенью надежности типы рельефа разделяются при использовании диапазонов азимутальных значений (рисунок 5.20, *в, г*). При этом показатель, отражающий диапазон значений субмеридионального аспекта, в данном случае работает лучше (рисунок 5.20, *в*).

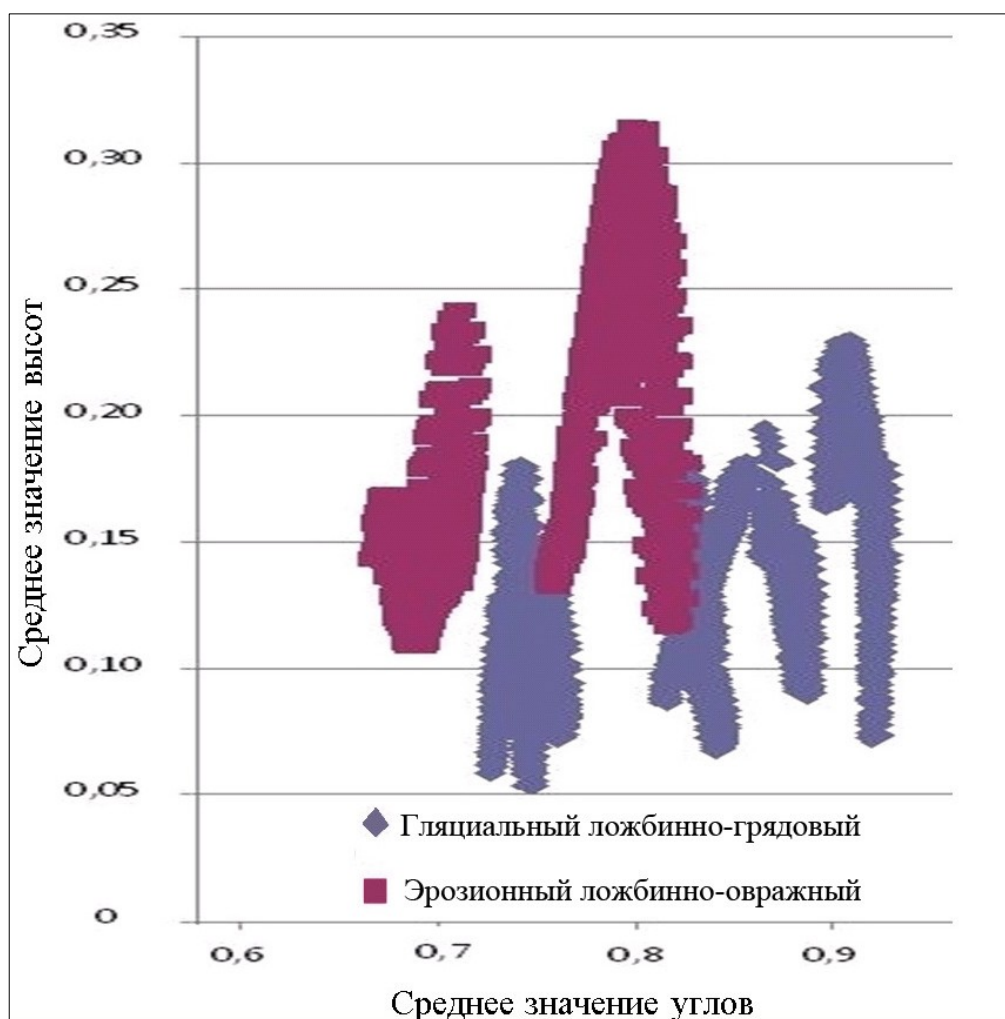


Рисунок 5.19 – Двумерная точечная диаграмма гляциального ложбинно-грядового и эрозионного ложбинно-овражного типов рельефа

Озерные отложения имеют специфику в разных частях котловины и образуют несколько типов рельефа: озерный на моренном цоколе, озерный на алевропесчаном основании, озерный с барами. На двумерной диаграмме (рисунок 5.21) показано как среди выровненных участков озерной равнины выделяется озерный на моренном цоколе, в то время как озерный на алевропесчаном основании и озерный с барами, пересекаясь значениями, образуют группу озерного аккумулятивного рельефа. При этом озерный на морене с большей или меньшей степенью надежности отделяется по двум разным парам показателей.

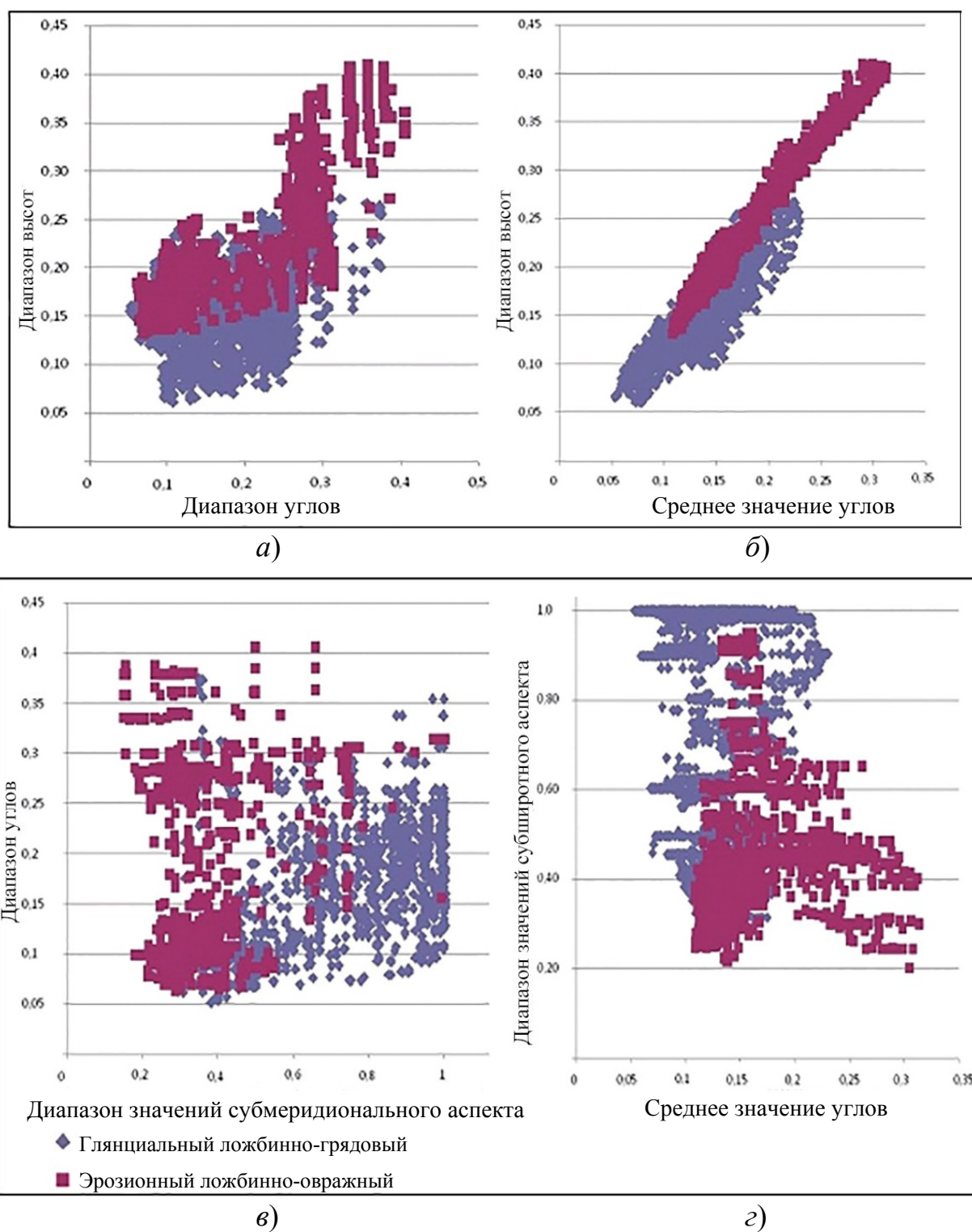


Рисунок 5.20 – Гляциальный ложбинно-грядовый и эрозионный ложбинно-овражный типы рельефа на двумерных точечных диаграммах в координатах XU :

а) X – диапазон углов; Y – диапазон высот; б) X – среднее значение углов; Y – диапазон высот; в) X – диапазон значений субмеридионального аспекта; Y – диапазон углов; г) X – среднее значение углов; Y – диапазон значений субширотного аспекта

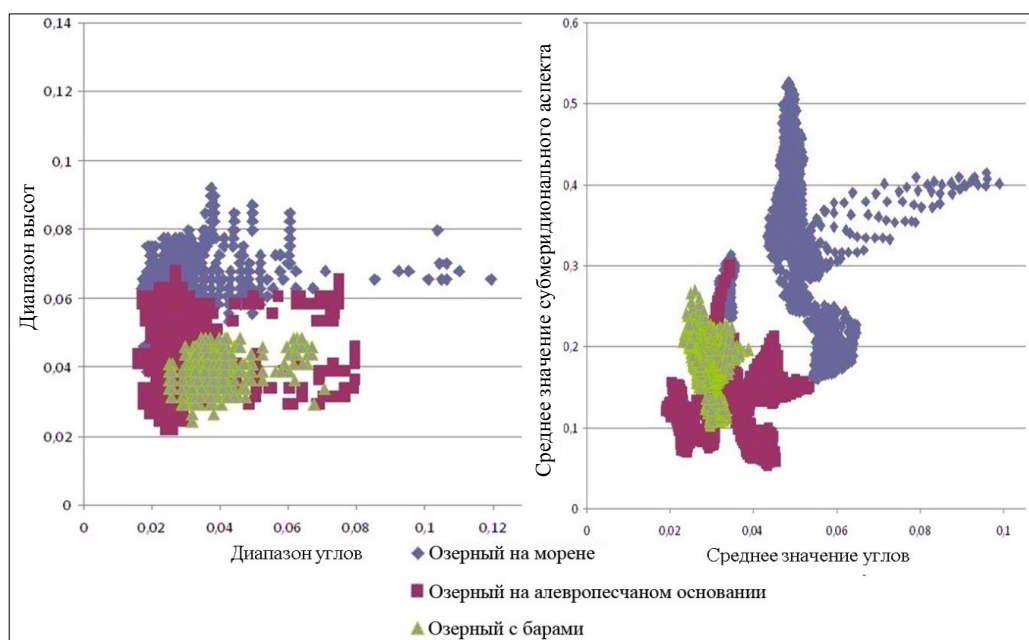


Рисунок 5.21 – Двумерная точечная диаграмма озерных типов рельефа:
на моренном цоколе, на алевропесчаном основании, с барами

Для разделения озерного аккумулятивного рельефа используются диапазон углов и субширотный аспект (рисунок 5.22).

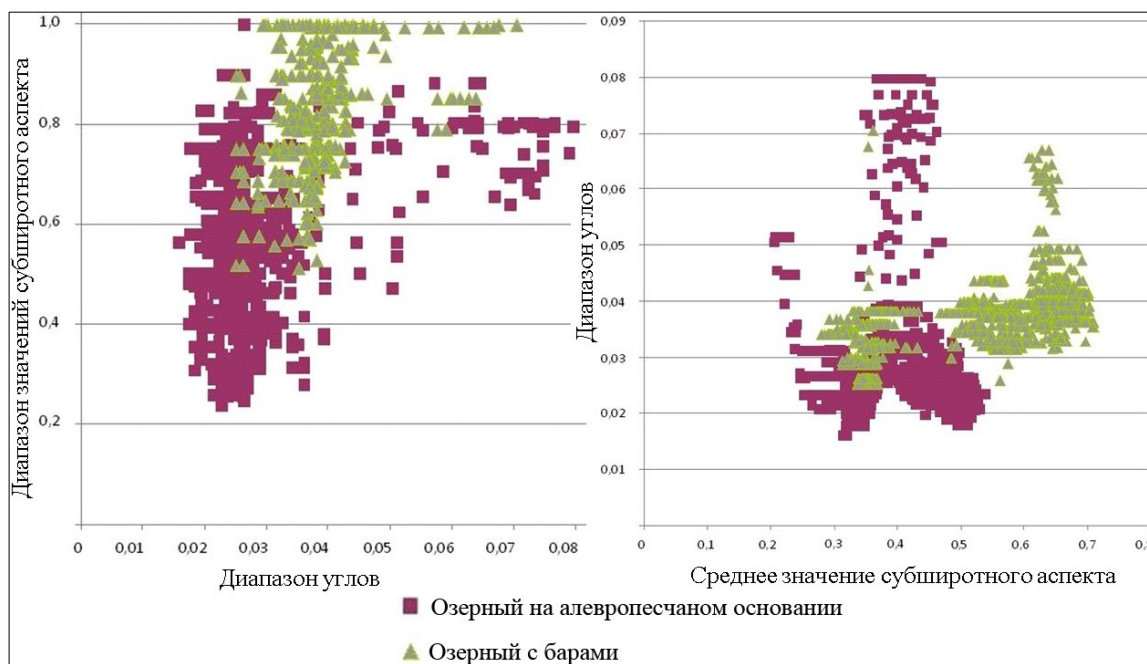


Рисунок 5.22 – Разделение озерного аккумулятивного рельефа

Из анализа диаграмм видно, что полного разделения морфокомплексов не происходит. Однако повысить точность разделения позволяет предварительное районирование территории на неотектонические сегменты, а также использование масок.

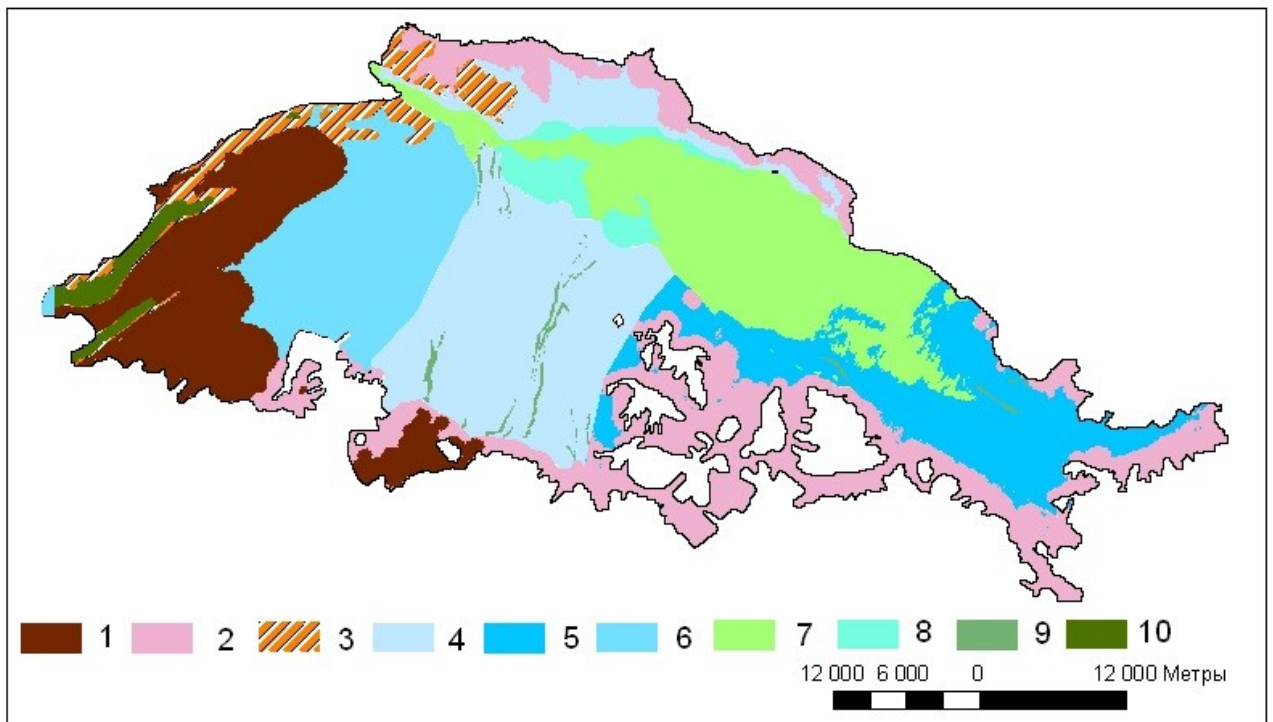
Таким образом, на основе предварительного анализа морфометрических показателей удалось построить ветвящуюся схему дихотомического разбиения рельефа на отдельные типы и их группировки (рисунок 5.23). Для каждой точки ветвления подбираются наиболее эффективные показатели. В соответствии со схемой (см. рисунок 5.23) по большинству показателей днище котловины может быть разделено на равнинные и расчлененные участки, как внутри каждого неотектонического сегмента, так и в целом. Внутри равнинного рельефа по минимальным значениям средних углов и диапазона высот от озерной равнины отделяется долина р. Чуи. Для последней характерны большие значения азимутального разброса обеих проекций. Это обусловлено тем, что в восточной части долина р. Чуи распадается на мозаику элементарных площадок разных азимутальных значений. На следующем шаге озерный рельеф разбивается на две группировки. Вторично расчлененные участки озерной равнины отличаются от выровненных озерных участков по вертикальной расчлененности и диапазону углов. Вторично расчлененная озерная равнина делится на термокарстовый рельеф и аллювиальный рельеф притоков р. Чуи. Для термокарстового рельефа характерны повышенные значения диапазона углов и азимутальных проекций. Аллювиальный рельеф притоков отличается от термокарстового в основном по среднему значению углов. Выровненные участки озерной равнины по среднему значению углов и субширотному аспекту разделяются на группу озерного аккумулятивного рельефа и неделимый далее тип – озерный на моренном цоколе. Озерный аккумулятивный рельеф по диапазону углов и субширотному аспекту подразделяется на озерный на алевропесчаном основании и озерный с барами.



Рисунок 5.23 – Схема последовательности выделения типов рельефа и их группировок

На рисунке 5.24 представлена итоговая специальная карта типов рельефа, полученная в результате последовательной серии классификаций, не противоречащих геоморфологическим исследованиям предшественников [112]. По бортам котловины выделился делювиально-пролювиальный тип рельефа. Между реками Елангаш и Чаган расположен холмисто-грядовый гляциальный рельеф с врезанными в него долинами притоков р. Чуи. Отделился эрозионный ложбинно-овражный тип рельефа, распространенный в долине р. Чаган-Узун и в западной части наклонной равнины. В предгорную равнину врезается многорукавная долина р. Чуи, которая простирается с юго-востока на северо-запад. Южнее аллювиального рельефа расположена обширная равнина с озерным типом рельефа, который имеет территориальную специфику на разных участках. На юго-восточной окраине котловины распространены асимметричные гряды с более пологим за-

падным склоном. Они представляют собой озерные бары. Западнее на обширной территории между долинами рек Елангаш и Кокозек, а также в восточной части наклонной озерной равнины распространен выровненный озерный рельеф на алевропесчаном основании, рассекаемый руслами левых притоков р. Чуи. К юго-западу, где увеличиваются высота и угол наклона равнины, расположены озерные отложения на моренном цоколе.



1 – гляциальный ложбинно-грядовый; 2 – делювиально-пролювиальный; 3 – эрозионный ложбинно-овражный; 4 – озерный на алевропесчаном основании; 5 – озерный с барами; 6 – озерный на моренном цоколе; 7 – аллювиальный многорукавной долины р. Чуи; 8 – термокарстовый; 9 – аллювиальный врезанных долин; 10 – аллювиальный притоков р. Чуи

Рисунок 5.24 – Специальная карта типов рельефа Чуйской котловины

Использованный подход не всегда позволяет распознать те типы рельефа, которые выделяются, например, на картах генетических типов четвертичных отложений. Не удалось выделить озерные террасы, расположенные на северном борту котловины в интервале высот 2 100–2 250 м [79]. Они образованы в резуль-

тате прибрежной волноприбойной деятельности и представляют собой хорошо выраженные уступы (несколько метров высотой) и площадки (десятки метров шириной). Кроме того, не был выделен в отдельный тип селевый рельеф нижней части слабонаклонной предгорной равнины, установленный в [38]. По морфометрическим показателям оказалось невозможным разделение гляциокомплексов максимального и первого постмаксимального оледенений, выделяемые предшественниками, а также деление аллювиального рельефа Чуйской долины на разновозрастные террасы. Аллювиальные отложения притоков не на всем своем протяжении проявляются по морфометрическим показателям пространственного разрешения ЦМР SRTM. Следовательно, не всегда генетические модели, которые используются исследователями, оказываются проявленными в морфометрических характеристиках. С другой стороны, нередко начинают выделяться статистически обусловленные новые типы рельефа.

Выводы по пятому разделу

Второй уровень полноты определенности морфогенетических данных характеризуется более четкими представлениями о происхождении рельефа изучаемой территории, однако не предполагает деления рельефа на таксономические единицы, более дробные, чем тип рельефа (формы и элементы рельефа). Такая ситуация может быть связана, например, с пространственным разрешением цифровых моделей рельефа, недостаточным для дробной сегментации на формы рельефа (которую невозможно проводить на субпиксельном уровне), или же с геоморфологической спецификой района. Однородные типы рельефа могут выделяться на основе неуправляемых и управляемых классификаций, факторного анализа, нейронных сетей и т. п.

В результате проведенных исследований разработана технология картографирования гомогенных типов рельефа на основе покомпонентного и многомерного анализа морфометрических показателей, полученных по цифровой модели рельефа SRTM. Выделение и распознавание типов рельефа в рамках предложен-

ного подхода предлагается осуществлять на основе пошаговой ветвящейся серии классификаций с использованием масок, отчленяющих из анализируемой области уже выделенные части. Морфометрические показатели, получаемые по ЦМР, необходимо подбирать в зависимости от особенностей территории.

Предполагаемый подход имеет ограничения. С одной стороны, не все типы рельефа, комплексно выделяемые в полевых условиях, могут распознаваться по морфометрическим признакам. С другой стороны, по морфометрическим показателям могут статистически обособляться типы, которые по каким-либо причинам не считались значимыми в другом признаковом пространстве. Возможность выделения и распознавания типов рельефа во многом контролируется пространственным разрешением ЦМР. Не всегда можно распознать тип рельефа, состоящий из мелких форм или имеющий ограниченное площадное распространение.

Для повышения точности разделения использовалось предварительное районирование территории на неотектонические сегменты, а также разграничение пространства распознавания и количества выделяемых классов рельефа путем построения масок. На основе предварительного анализа морфометрических показателей построена ветвящаяся схема дихотомического разбиения рельефа на отдельные типы и их группировки. Для каждой точки ветвления подбираются наиболее эффективные показатели.

6 ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ТИПОВ РЕЛЬЕФА ПО СООТНОШЕНИЮ ДОМИНИРУЮЩИХ ФОРМ РЕЛЬЕФА В СКОЛЬЗЯЩЕМ ОКНЕ

На третьем уровне полноты информационной определенности мы можем с достаточной степенью точности и адекватности выделять формы рельефа разного генезиса на основе их морфометрических характеристик, а также типы рельефа, представляющие собой области распространения определенных сочетаний разных форм. Для этого уровня формы рельефа могут выделяться на основе целевых морфометрических признаков и их сочетаний, а типы рельефа – на основе сопряженного анализа плотностных моделей, построенных для каждого класса выделенных форм.

Рельеф юга Западной Сибири изучается уже более ста лет. Долгое время основополагающей оставалась концепция существования Мансийского озера-моря – подпрудного бассейна на севере во время оледенений [68]. Она возникла в конце 80-х гг. XX в. и хорошо объясняла наличие большого количества «остаточных» озер на данной территории. Также долгое время наиболее дискуссионным оставался вопрос о гривном рельефе. Существует оригинальная идея образования озер за счет гидросферной катастрофы, в ходе которой гигантские объемы воды выплеснулись из-под Арктического ледникового суперпокрова и оставили следы на обширной территории [25]. Однако основными теориями происхождения гривного рельефа были субаквальная и эоловая. В настоящее время опровергнуто существование Мансийского озера, а общепринятой концепцией происхождения грив является эоловая теория [14].

На основе литературных данных и объяснительных записок к геологическим картам была получена достаточно ясная картина о наборе форм рельефа и его происхождении. Рельеф данной территории состоит из грив, лощин, озерных котловин, озеровидных расширений, полого-равнинного водораздела, в различной степени осложненного изометричными и удлиненными холмами, а также суффо-

зионно-просадочными западинами. Высота грив варьирует от 3 до 12 м, ширина – 0,3–1 км, длина – 2–8 км. Озерные поверхности представлены днищами современных и древних котловин, размеры которых в поперечнике достигают от нескольких сот метров до нескольких километров, а в некоторых случаях существенно превышают 10 км. Речные русла и террасы относительно узкие и, если не включать в них озеровидные расширения, сколько-нибудь значительной территории в районе не занимают.

С востока на запад территорию пересекает долина р. Оми с серией правобережных притоков, расположенных в северной половине участка. В строении основных долин (р. Омь и ее наиболее крупные притоки – Тартас и Кама) четко прослеживается чередование относительно узких и расширенных участков. Выделяются низкая пойма и первая надпойменная терраса, выраженная в основном на участках сужения долины. В районах озеровидных расширений площадки первой надпойменной террасы и поймы трудно различимы, т. е. морфологически озеровидные расширения можно считать первой надпойменной террасой, хотя возраст и изначальный генезис этих поверхностей могут быть разными. На современном этапе геологического развития территории первая надпойменная терраса представляет собой высокую пойму, раз в несколько лет затапливаемую аномально полноводными паводками. Как правило, аллювиальная терраса имеет двухъярусное строение: нижний ярус сложен песками, а верхний – суглинками.

Построив по ЦМР морфометрические показатели, необходимо проанализировать, как на них проявляются определенные формы рельефа. Для каких-то форм достаточно указать определенный диапазон морфометрического параметра. Простым примером в данном случае являются котловины современных озер, что было рассмотрено в четвертом разделе (4.3). Хорошо по ЦМР выделяются и гривы. Однако они не могут быть охарактеризованы одним диапазоном, так как у них подчеркиваются края граней, а по оси находится уплощенная поверхность, зачастую осложненная небольшими впадинами. В данном случае для выделения некоторых форм рельефа размер скользящего окна для расчета относительных морфометри-

ческих показателей необходимо подобрать так, чтобы в него попадали основные элементы форм земной поверхности (границы и ребра). Это позволяет на основе анализа сочетания элементов выделять формы.

На рисунке 6.1 в качестве примера показан подбор окна для выделения глив. Основные элементы глив – это две грани: северо-западной и юго-восточной ориентировки. Они четко выделяются на схеме экспозиции склонов. Для большинства глив эти две грани попадают в круг радиусом 300 м.

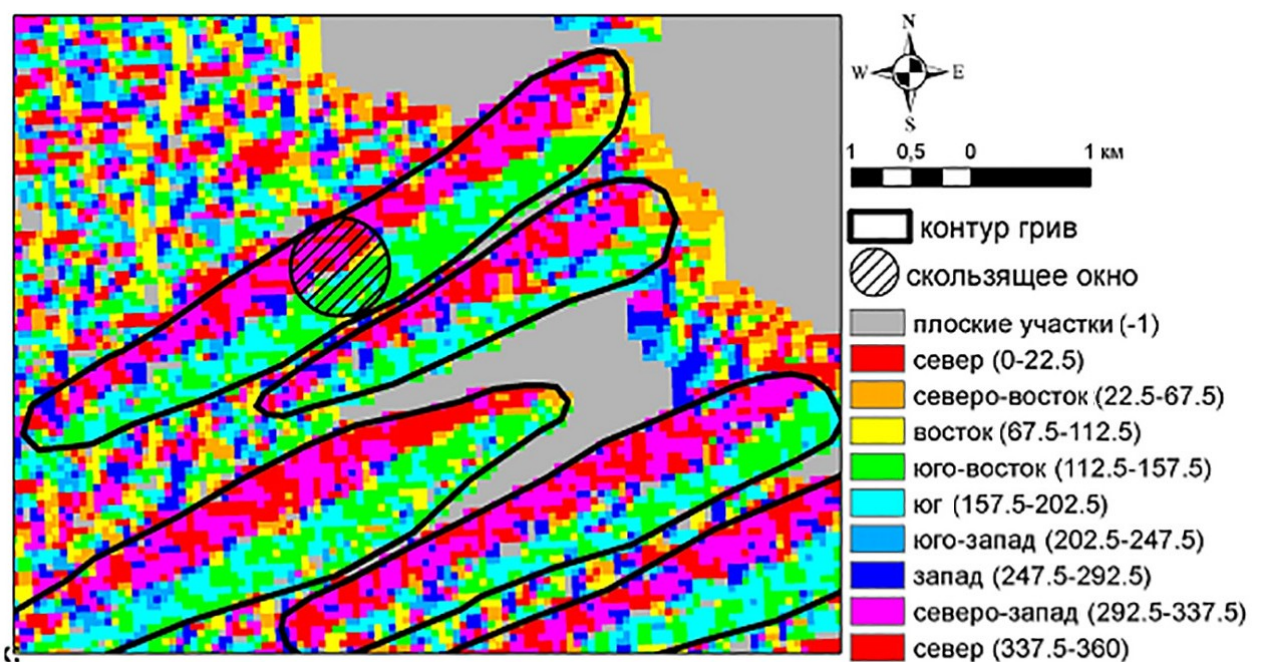
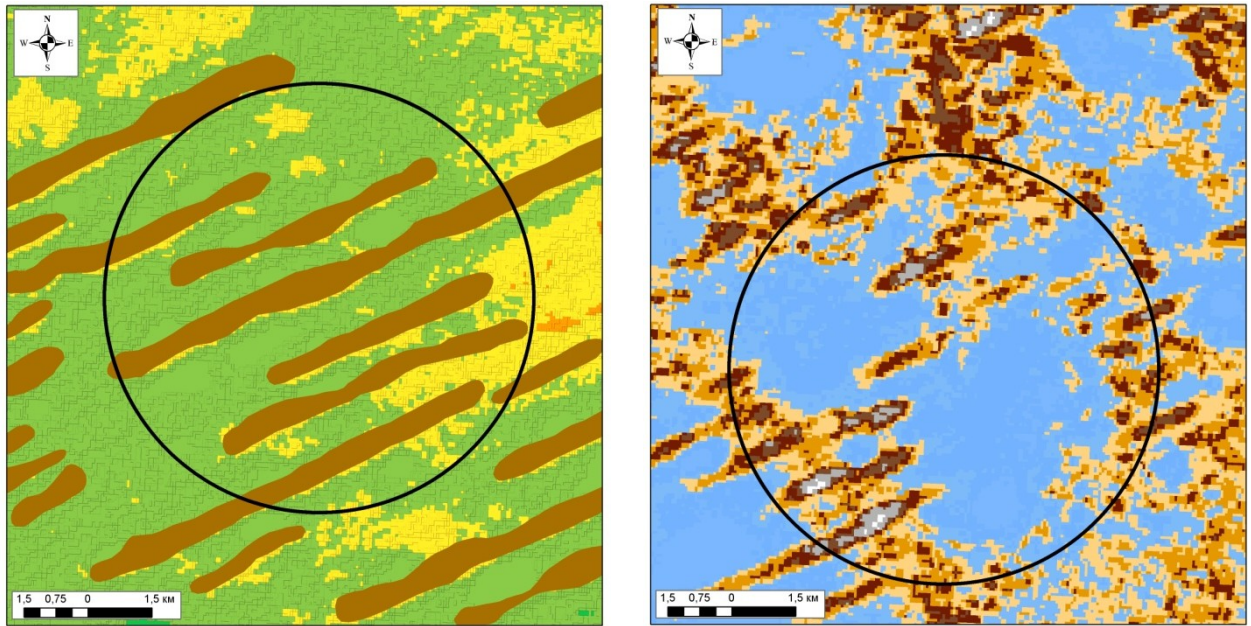


Рисунок 6.1 – Схема граней гливного рельефа

Таким образом, по морфометрическим показателям были закартированы следующие формы рельефа: озера, гряды, палеоозерные котловины.

После того, как все формы были выделены, подбирался размер окна, отражающий густоту распространения этих форм. В связи с тем, что озерные поверхности и гряды имеют достаточно крупные размеры, радиус окна составил 10 км (рисунок 6.2). В скользящем окне указанного размера были построены две плотностные карты, оконтуривающие области распространения глив и озерных поверхностей соответственно.



а)

б)

Рисунок 6.2 – Подбор скользящего окна для построения схем типов рельефа: а) грядного; б) озерного

Так как гряды нередко продолжаютя на днища котловин, а древние озерные поверхности «проникают» в межгрядные пространства, значительная часть рельефа является комплексной. При наложении плотностных карт гряд и озерных поверхностей были получены контуры грядно-озерного рельефа.

Геоморфологически территория сильно неоднородна как в направлении север – юг, так и по линии восток – запад. Абсолютные высоты изменяются с севера на юг от 57 до 175 м. Северо-восточная часть занята увалообразным рельефом, в некоторых местах осложненным небольшими грядами. В северной части Барабинской низменности развит грядно-озерный рельеф (рисунок 6.3, а), который ближе к Прииртышскому валу сменяется мелкоозерным рельефом. В районе озера Чаны распространен грядно-котловинный рельеф, а сами гряды выражены наиболее четко. Западнее озера Чаны котловины озер встречаются реже, а гряды сменяются поперечными дюнами. При этом прослеживается переходный участок (рисунок 6.3, б), где встречаются как гряды, так и поперечные дюны, а озерные котловины становятся менее изометричными и выстраиваются в цепочки, перпен-

дикулярные гривам и увалам. Центральная часть Кулундинской равнины занята крупными и мелкими озерными котловинами, а эоловые формы ориентируются перпендикулярно увалам Приобского плато (рисунок 6.3, *в*). Четко выделяется участок «боровые пески», который относится к верхнечетвертичным современным эоловым отложениям. Западнее расположены дочетвертичные отложения.

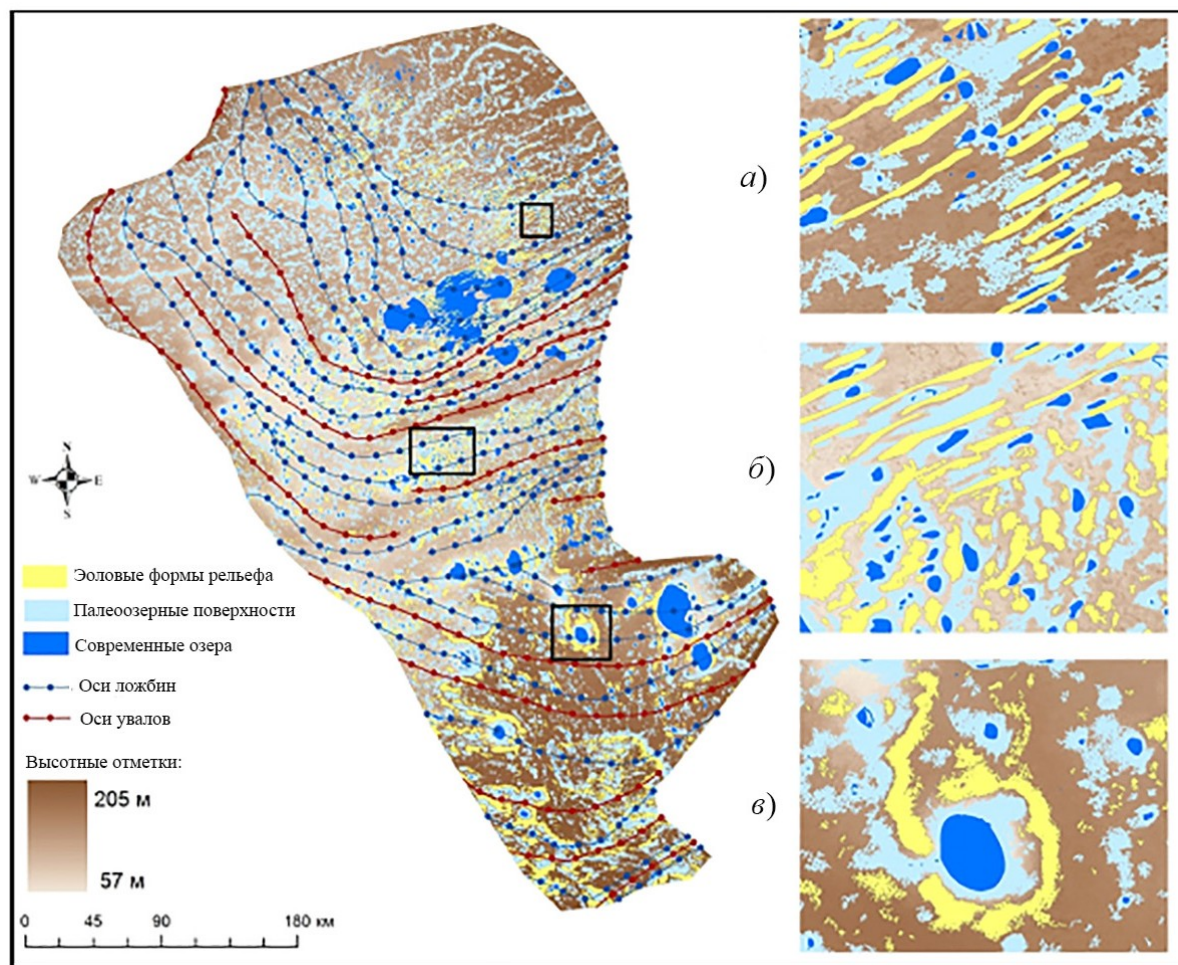


Рисунок 6.3 – Формы рельефа и геоморфологические особенности юга Западно-Сибирской равнины: *а*) преобладание грив и озерных котловин; *б*) распространение грив, поперечных дюн и мелких озерных котловин, выстраивающихся в цепочки; *в*) распространение крупных и мелких озерных котловин, поперечных дюн и береговых валов

На территории Кулунды и Барабы хорошо просматривается влияние палеорельефа на формирование современного облика территории и процессов, распро-

страненных на ней. Полевые исследования выявили наличие береговых линий древних ложбин стока, а также линейно вытянутые цепочки озер, приуроченные к продолжениям осей древних ложбин стока, и т. д. [40].

По удельному площадному соотношению форм рельефа построена специальная карта следующих типов рельефа: озерного, гривного, гривно-озерного и полого-равнинного (рисунок 6.4).

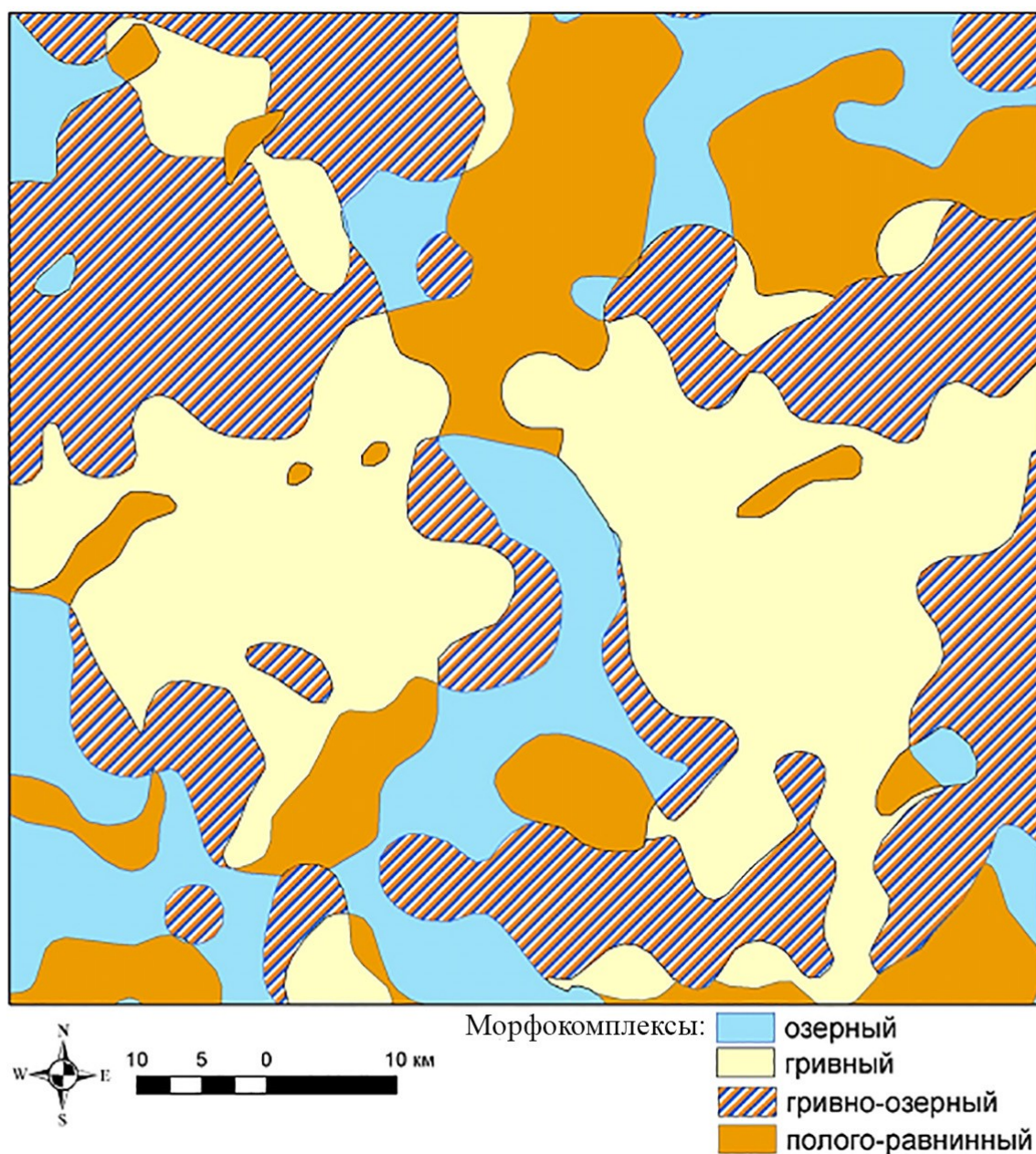


Рисунок 6.4 – Фрагмент специальной карты типов рельефа эталонного участка Венгеровского района

Как уже отмечалось выше, технологии, использованные на более низком уровне, могут применяться и на уровнях выше, в условиях большей доопределенности. Для иллюстрации этого картографирование озерного, гривного, озерно-гривного и равнинного типов рельефа проводилось и на основе управляемых классификаций.

Радиус скользящего окна для построения морфометрических показателей составил 5 км, что меньше, чем размер скользящего окна, отражающего густоту распространения форм в первом случае. Это вызвано тем, что в рамках первого подхода мы анализируем сочетания отдельных форм, а в рамках второго – рассматриваем некоторые усредненные на определенном пространстве типы рельефа. Анализ морфометрических характеристик показал, что средние значения углов и плотность ребер рельефа являются наиболее эффективными для разделения рельефа на типы. В связи со спецификой территории дополнительно построены еще два показателя: отклонения высот от тренда и плотность линейных структур.

По вертикальной и горизонтальной расчлененности территория разделилась на две части. Первая включала в себя расчлененные участки: водораздел и гривы, вторая – менее расчлененные: озерный тип рельефа и комплексный гривно-озерный тип. Полого-равнинные пространства по расчлененности схожи с гривами, но не являются линейно вытянутыми. Поэтому для их разделения использовались средние значения углов и показатель линейности. Вторая группировка типов рельефа была разделена достаточно легко также по этим показателям.

На рисунке 6.5 показаны две итоговые схемы типов рельефа, построенные двумя разными способами [108]. В общих чертах они похожи. Расхождение возникает в тех случаях, когда, например, гривный рельеф переходит в гривно-озерный, т. е. в граничных зонах между разными типами. Кроме того, способ построения на основе доминирующих форм чувствителен к единичным формам, т. е. в месте, где встречается всего лишь одна достаточно крупная гряда, будет обязательно выделен локальный участок гривного типа рельефа. Если разбивать территорию на более дробные части по удельному соотношению площадей, а при под-

боре эталонных полигонов также учитывать разные площадные соотношения форм, можно добиться сходства результатов обоих методов и получить наиболее адекватные схемы типов рельефа.

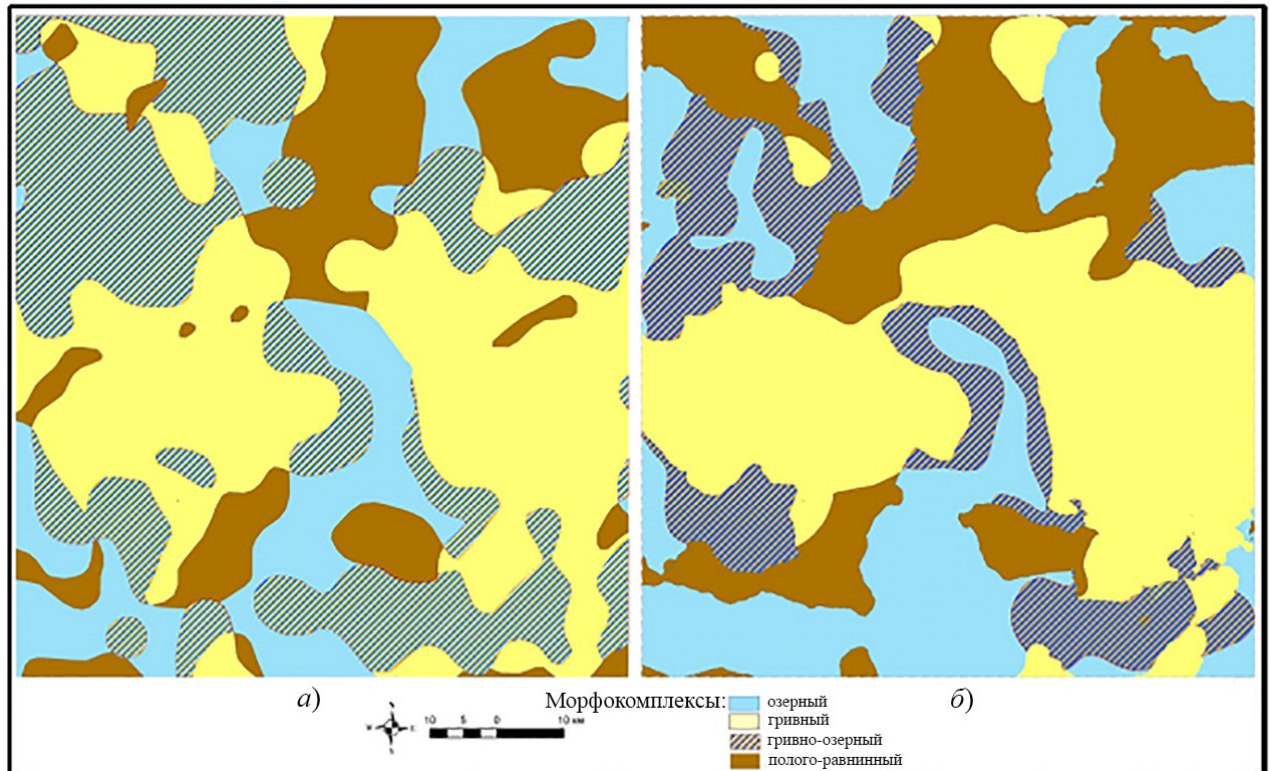


Рисунок 6.5 – Фрагменты специальных карт типов рельефа эталонного участка Венгеровского района, полученные в результате: а) определения площадного соотношения форм; б) управляемых классификаций

Во втором разделе уже говорилось о точности модели SRTM и ошибках, вносимых растительностью. Однако значения точности данных SRTM на практике оказались значительно лучше, чем изначально предполагалось [160]. Для оценки точности цифровой модели SRTM на территорию Венгеровского района были взяты пять полигонов размером 1×1 км. В качестве полигонов выбирались участки с однородной поверхностью, свободные от леса (лес выделялся по космоснимку Landsat). На всех полигонах стандартное отклонение было 0,5–0,8 м. Значения точности по высоте ЦМР SRTM зависят от типа земной поверхности. Рав-

нинные территории юга Западной Сибири как на Предалтайской равнине, так и в межгорных котловинах имеют свою особенность. Там погрешность измерения абсолютных высот территории с перепадами ± 1 м (или несколько метров) приводит к тому, что на ЦМР отображается множество мелких неровностей. На схеме экспозиции склонов, построенной по ЦМР, эти неровности проявляются в виде мозаики разнонаправленных пикселей (рисунок 6.6).

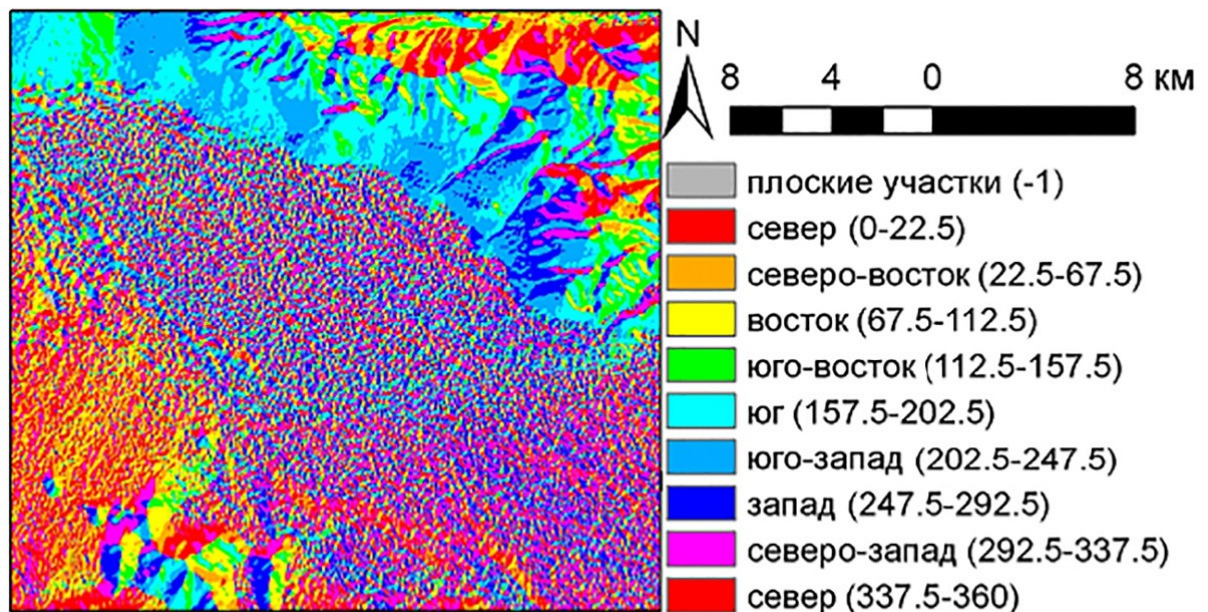


Рисунок 6.6 – Мелкие неровности ЦМР на примере многорукавной долины р. Чуи (экспозиция склонов фрагмента Чуйской котловины)

Существенный вклад в ЦМР SRTM вносит древесная растительность. На рисунке 6.7 показана грива Мыс, которая четко проявлена на ЦМР, и, кроме того, видна линия продольного профиля. На гриве есть часть пикселей с более высоким значением высоты (желтый и коричневый цвета). Из снимка (см. рисунок 6.7, б) понятно, что это лес.

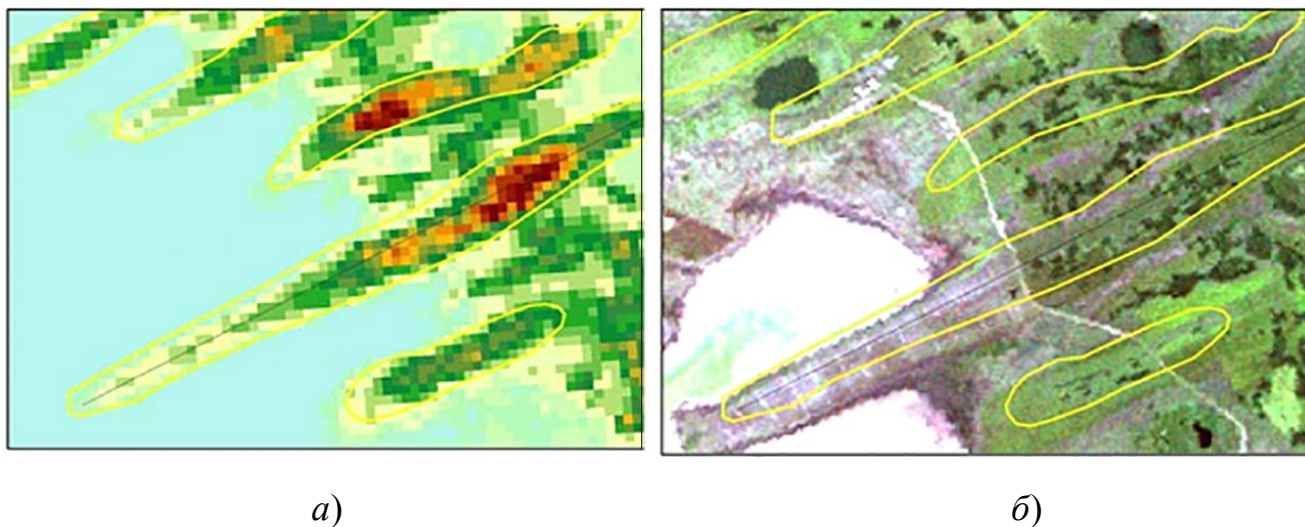


Рисунок 6.7 – Грива Мыс: а) на цифровой модели рельефа SRTM;
б) на космоснимке Landsat

На рисунке 6.8 показан профиль, построенный по ЦМР. Зеленой линией отмечено примерное очертание гривы. Из рисунка видно, что ошибка по высоте из-за лесной растительности может достигать 4–8 м.

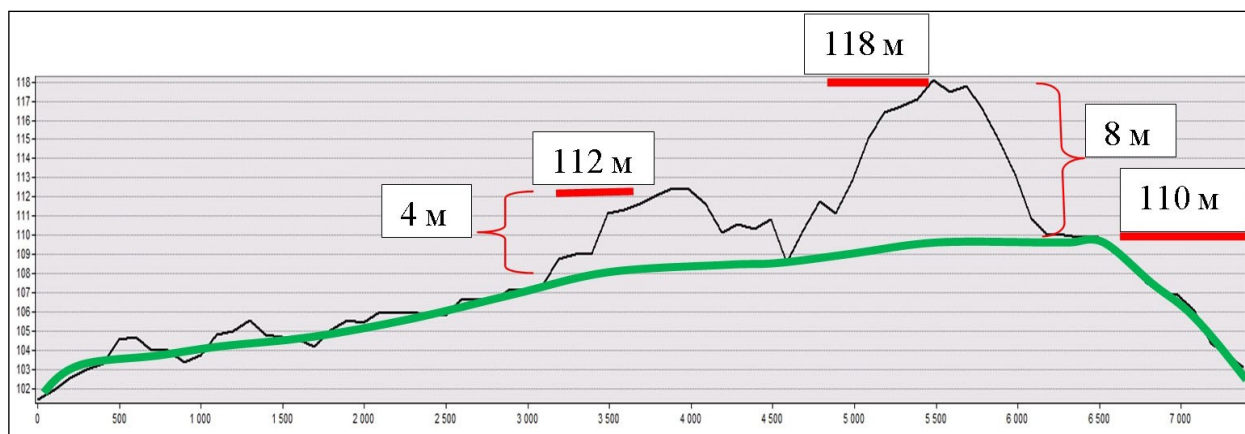


Рисунок 6.8 – Продольный профиль гривы Мыс

В нашем исследовании растительность не вносит значимых ошибок в результаты классификации. Для повышения эффективности классификации используются дополнительные меры, такие как классификация по дереву решений и построение масок.

Рассмотрим технологию выделения и использования масок для нашего случая. Изначально по какому-то показателю вся территория разделяется на два типа рельефа (к примеру, расчлененный и плоский). В свою очередь, по другим показателям эти типы разделяются на группы, затем на подгруппы и т. д. В конечном счете на очередном этапе появляется неделимая часть. Для каждой точки ветвления подбираются наиболее эффективные морфометрические показатели или их сочетания. На рисунке 6.9 показан обобщенный пример такой дихотомической схемы разбиения рельефа на морфокомплексы. Также на рисунке отображено, как на разных этапах могут обособляться морфокомплексы. Деление территории на участки не происходит бесконечно, так как (что уже было сказано выше) потенциальный набор морфокомплексов выявляется на стадии проработки литературных и фондовых данных.

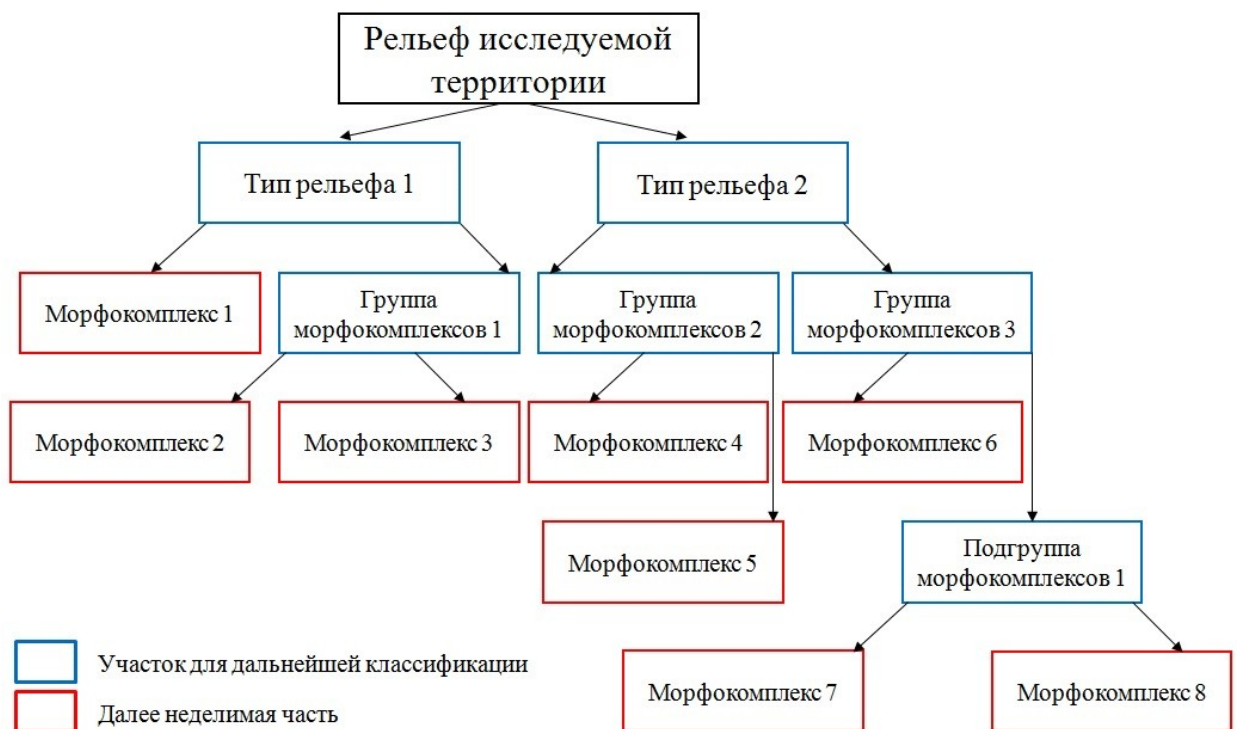


Рисунок 6.9 – Схема дихотомического разбиения рельефа

Данная последовательность разбиения рельефа реализуется путем построения по выделенным участкам масок, вычлняющих из дальнейшего анализа неде-

лимую часть (рисунок 6.10). Соответственно, на каждом последующем шаге уменьшаются пространство распознавания и количество выделяемых классов рельефа.



Рисунок 6.10 – Построение масок

В случае с построением типов рельефа Венгеровского района первым способом мы оконтурили в первую очередь озерный и гривный типы рельефа. Эти формы рельефа однозначно определялись по ЦМР, несмотря на то, что гривы местами залесены. Однако основная масса древесной растительности произрастает на полого-равнинном типе рельефа, который выделялся на последнем этапе как оставшаяся неделимая часть. При построении специальной карты типов рельефа данной территории с использованием управляемых классификаций растительность также не могла вносить ощутимых ошибок в результаты. Это достигалось за счет того, что скользящее окно, использовавшееся при расчете морфометрических показателей, значительно усредняло данные. Дополнительно для повышения точности разделения применялся метод последовательного построения масок.

Выводы по шестому разделу

Третий уровень полноты определенности морфогенетических данных предполагает выделение форм рельефа разного генезиса на основе их морфометрических характеристик, а также типов рельефа, представляющих собой области пространства определенных сочетаний разных форм. Формы рельефа могут выделяться на основе целевых морфометрических признаков и их сочетаний, а типы рельефа – на основе сопряженного анализа плотностных моделей, построенных для каждого класса выделенных форм.

Технологии, использованные на более низком уровне, могут применяться и на уровнях выше, в условиях большей определенности. Это было проиллюстрировано на примере специальных карт типов рельефа Барабинской равнины, построенных двумя способами: на основе определения площадного соотношения форм и на основе управляемых классификаций.

7 РЕТРОСПЕКТИВНОЕ И ПРОГНОЗНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ

Четвертый уровень (наиболее полный уровень знаний о рельефе) позволяет рассматривать рельеф как абиотическую составляющую геосистем. Исследование на данном уровне предполагает рассмотрение функционального значения конкретных форм и типов рельефа, учитывает их динамические и статические свойства как геолого-геоморфологическую основу природно-территориальных комплексов. Комплексирование этих данных с данными по биотическим компонентам делает возможным ретроспективное и прогнозное моделирование геосистем.

Геолого-геоморфологический каркас территории (формы и типы рельефа, а также и слагающие их породы и отложения) обуславливает реакции экосистем на региональные изменения климата и антропогенный пресс. Проиллюстрируем это на примере Барабинской равнины. Слагающие рельеф отложения (литогенная основа) Барабинской равнины представлены преимущественно субэзральным покровом, однородным по гранулометрическому составу. Грунтовые воды на данной территории находятся близко к поверхности. Структура растительного покрова изменяется в зависимости от степени гидроморфизма ландшафтов. Это отражается в площадном соотношении различных типов растительных сообществ и в их приуроченности к разным формам и типам рельефа. Таким образом, на данной территории степень гидроморфизма является одним из ключевых параметров, определяющих структуру и динамику растительного покрова. Она может эффективно использоваться для картографирования и мониторинга участков, на которых развиты различные типы сукцессионных систем растительности.

Подход к прогнозу динамики геосистем на основе исследования ее геолого-геоморфологической основы предполагает выявление биотических и абиотических индикаторов, характеризующих обстановки природной среды в зависимости от климатических ситуаций. Зная, как на динамику климатических ситуаций реагируют биотические компоненты геосистем (в частности, растительность) и как

они меняют свою приуроченность к различным компонентам геолого-геоморфологической основы ландшафтов, можно осуществлять как ретроспективное, так и прогнозное моделирование природных обстановок в регионе. Рассмотрим два примера такого моделирования для территории Барабинской равнины.

1 Геоинформационные ретроспективные модели на основе сочетания геологической (палеогеографической) и археологической информации с данными по геолого-геоморфологическому каркасу.

2 Геоинформационные прогнозные модели на основе ранжирования территории по степени уязвимости к экзогенным процессам в зависимости от динамики климата.

7.1 Геоинформационные ретроспективные модели на основе сочетания геологической (палеогеографической) и археологической информации с данными по геолого-геоморфологическому каркасу

Информацию о состоянии геосистем в прошлом получают при помощи изучения геологической летописи. Первые прогнозные сценарии на первую треть XXI в. для территории Западной Сибири [76] реализованы с использованием принципа палеоклиматических аналогий [10]. В качестве прогнозных моделей трансформации современных экосистем выступали палеогеографические реконструкции обстановок природной среды на определенные хроностратиграфические срезы – палеоаналоги прогнозируемого будущего.

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 [54].

В качестве биотического индикатора для оценки изменения климата мы используем такие обобщенные типы растительности, как луга, болота, степи, леса. Однако в голоцене для изучаемой территории в качестве ключевого индикатора можно использовать археологические данные [62]. Древние люди в данном случае выступают как исторический критерий изменений палеосреды (прежде всего, условий увлажнения/иссушения), поскольку изменения кормящего ландшафта приводили 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 плювиальные 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 дают 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 палеолите и неолите человек занимался охотой, рыбной ловлей и собирательством. В ходе domestikации 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 контролируется прежде всего климатическими условиями.

Анализ расположения поселений человека свидетельствует о наличии короткопериодических климатических циклов, поскольку объекты одной и той же

культуры могут иметь локализацию, характерную для эпох с различным увлажнением. По тем же причинам часто поселения располагаются в одних и тех же местах (многослойные памятники). Динамику влажности адекватнее представлять чередованием определенных типов парных палеоклиматических обстановок (например, сухо – умеренно, умеренно – влажно, влажно – очень влажно). 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 [109]. Для уточнения палеоклиматической динамики второй половины голоцена в Барабе были использованы геоморфологические позиции поселений (рисунок 7.1) [1, 62]. Так, приуроченность памятников к долинам рек и сниженным прибрежным поверхностям равнины маркирует сухие обстановки. Поселения, локализованные на более возвышенных прибрежных территориях, по сравнению со сниженными прибрежными поверхностями отражают умеренные условия, а приуроченность поселений к высоким прибрежным гривам, гривам внутри озер и отсутствие памятников в гидроморфных ландшафтах (сниженные участки полого-волнистой равнины и долины рек) маркируют влажные и очень влажные климатические обстановки.

В связи с динамикой климатических обстановок происходила смена растительности на гидроморфных и автоморфных территориях. Таким образом, смена климата для человека сопровождалась сменой типа хозяйствования в связи со сменой кормящего ландшафта. Модели кормящих ландшафтов для разных обстановок увлажнения составлены на основе экспертного мнения геоботаников (Лашинский Н. Н. и Королук А. Ю., Центральный сибирский ботанический сад СО РАН) (рисунок 7.2).

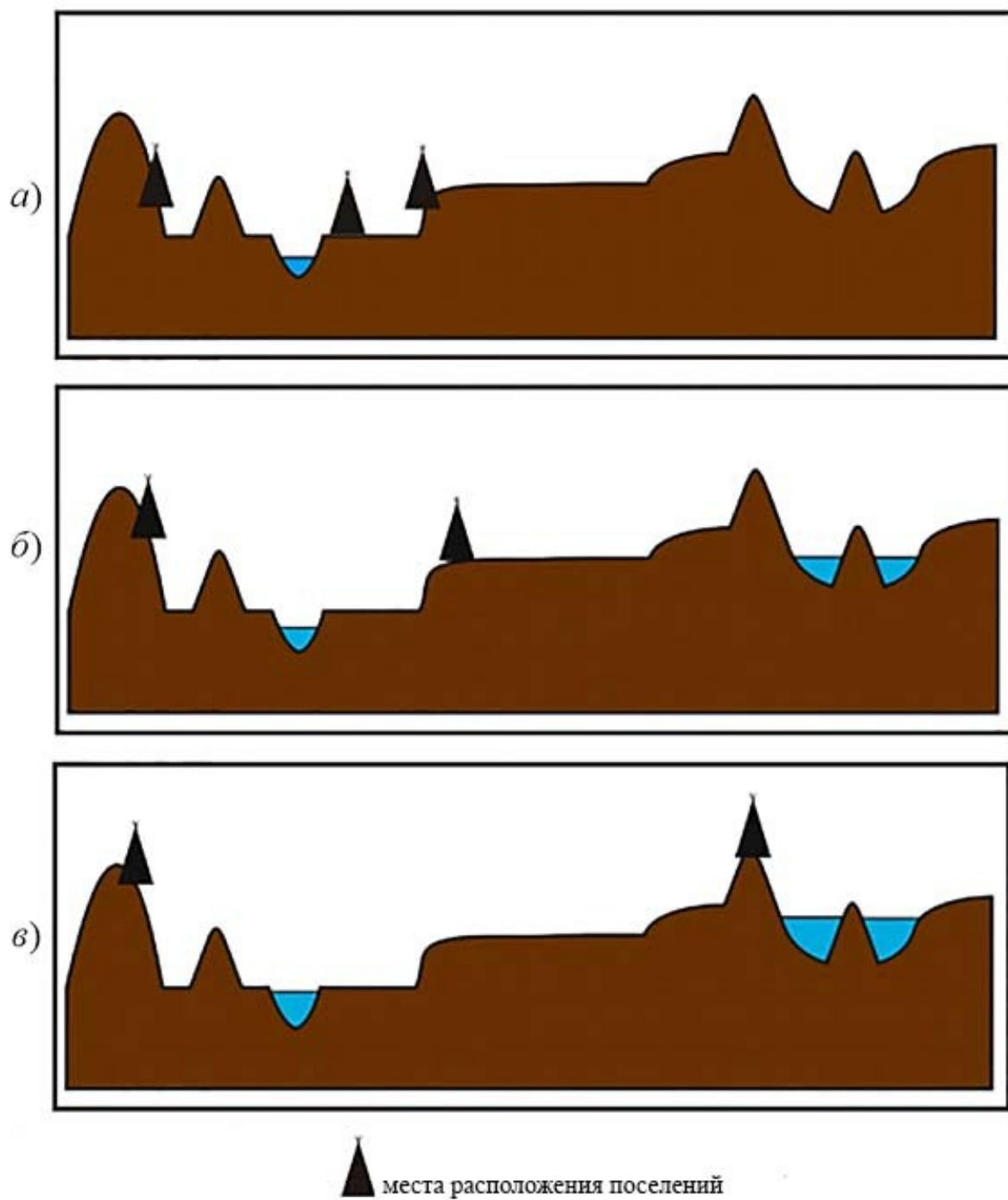


Рисунок 7.1 – Геоморфологические позиции памятников как индикаторы климатических палеообстановок: а) сухие условия; б) умеренные условия; в) влажные и очень влажные условия

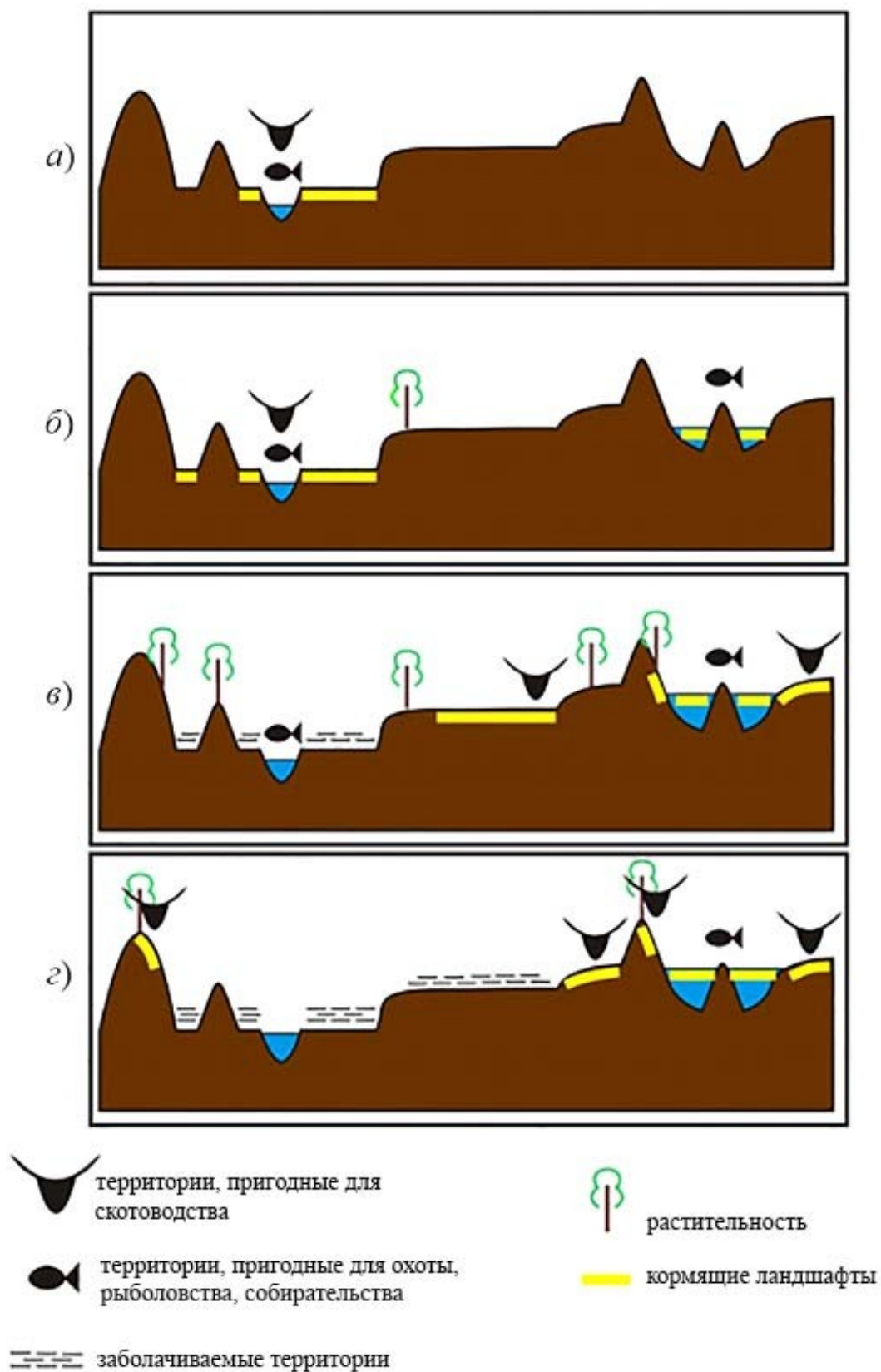


Рисунок 7.2 – Кормящие ландшафты в разных климатических обстановках

а) сухо; б) умеренно; в) влажно; г) очень влажно

При максимальном иссушении отсутствовала большая часть современных озер и болот, широко были распространены солончаки. Происходила деградация лесной растительности, на пространствах полого-волнистой равнины существовала степная растительность. Наиболее пригодными в таких условиях являлись приречные высокопродуктивные луга, используемые населением для скотоводства, рыболовства, собирательства и охоты (см. рисунок 7.2, *а*). При умеренных условиях в долинных ландшафтах развивалась луговая растительность. На полого-волнистой равнине существовали луговые степи и остепненные луга, а на наиболее глубоких понижениях равнины развивались озера и болота. Наиболее предпочтительными для хозяйственной деятельности оставались приречные пространства. Для занятия рыболовством, охотой и собирательством можно было использовать озера и близкие к ним территории (см. рисунок 7.2, *б*). Во влажных и очень влажных климатических обстановках палеоозерные котловины заполнялись водой, локальные понижения полого-волнистой равнины заболачивались. Во влажных условиях предпочтительными для занятия скотоводством являлись сниженные участки равнины, а в очень влажных – наиболее автоморфные территории, где происходило рассоление степных ландшафтов с их трансформацией в луговые. Реки были более полноводными, поэтому озеровидные приречные расширения и первая надпойменная терраса переходили в режим высокой или регулярно затапливаемой поймы [109] (см. рисунок 7.2, *в, г*).

На основе данных о рельефе, его связи с растительностью и предпочтений древнего человека построены три специальные карты обстановок природной среды в зависимости от условий увлажнения: минимальное (иссушенное), умеренное, максимальное (рисунок 7.3).

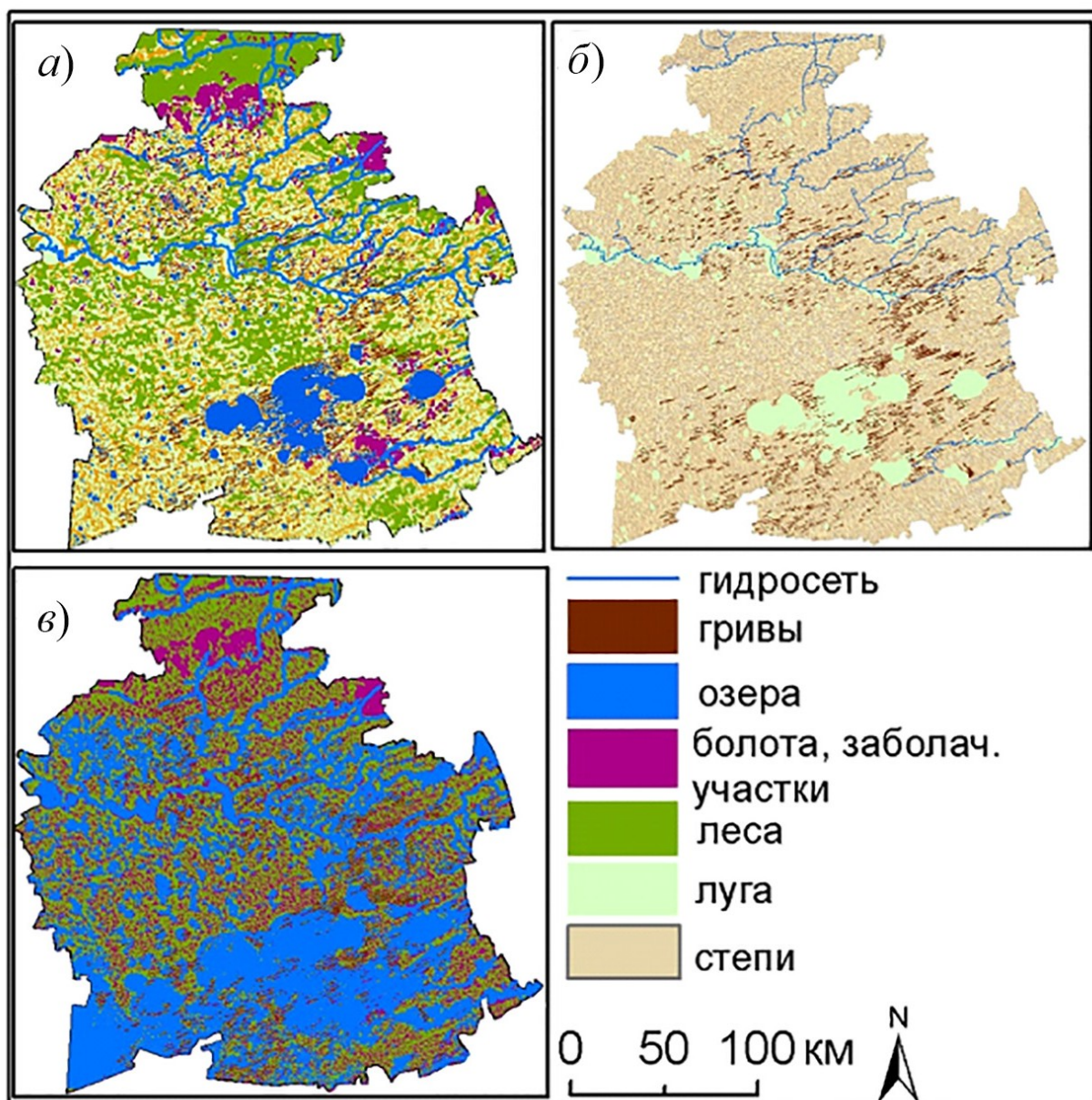


Рисунок 7.3 – Специальные карты обстановок природной среды в голоцене:

а) умеренные условия, близкие к современным; б) условия максимального иссушения; в) условия максимального увлажнения

Обоснование палеогеографических сценариев. 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. Поскольку имеются факты, которые свидетельствуют об очагово-дискретном преобразовании всей

территории Барабинской низменности [44], то на основе знаний о геолого-геоморфологическом каркасе и о поведении биотических компонентов в разных природных условиях возможно найти современные обстановки природной среды, соответствующие палеогеографическим реконструкциям прошлых эпох.

Несмотря на то, что набор форм рельефа на данной территории невелик, тем не менее различные их сочетания в совокупности с разными природными условиями позволяют найти современные обстановки природной среды, соответствующие разным палеогеографическим сценариям. Степень гидроморфизма территории оценивается на основе плотности палеоозерных котловин и плотности современных озер (рисунок 7.4). Те районы, где их наибольшие плотности совпадают, можно принять за аналог сценария увлажнения; сценарий иссушения предполагает, что в палеоозерных котловинах современные озера отсутствуют. Затем при дополнительном наложении сетки плотности грив выделяем области гривного рельефа во влажных условиях (в пределах крупной палеокотловины со множеством современных озер и развитием процесса заболачивания) и гривы, расположенные на равнине с небольшими обсыхающими современными озерами в обстановках иссушения. Таким образом, были подобраны 11 геоморфологических полигонов в разных условиях увлажнения (рисунок 7.4).

Отдельно в качестве типового выбран полигон в районе озера Чаны, так как он является крупным объектом с особыми геоморфологическими условиями (сочетание крупной палеоозерной котловины и вытянутых грив). Специфичным является долинный комплекс с наличием озерных расширений. Как описано выше, периодически первая надпойменная терраса переходит в режим высокой поймы и заливается водой, временами заболачивается. На юго-востоке показан участок, расположенный на возвышении (продолжение одного из увалов), а на юго-западе — участок, расположенный в самой низменной части Барабы. Соотношение геоморфологических объектов для подобранных полигонов показано на рисунке 7.5.

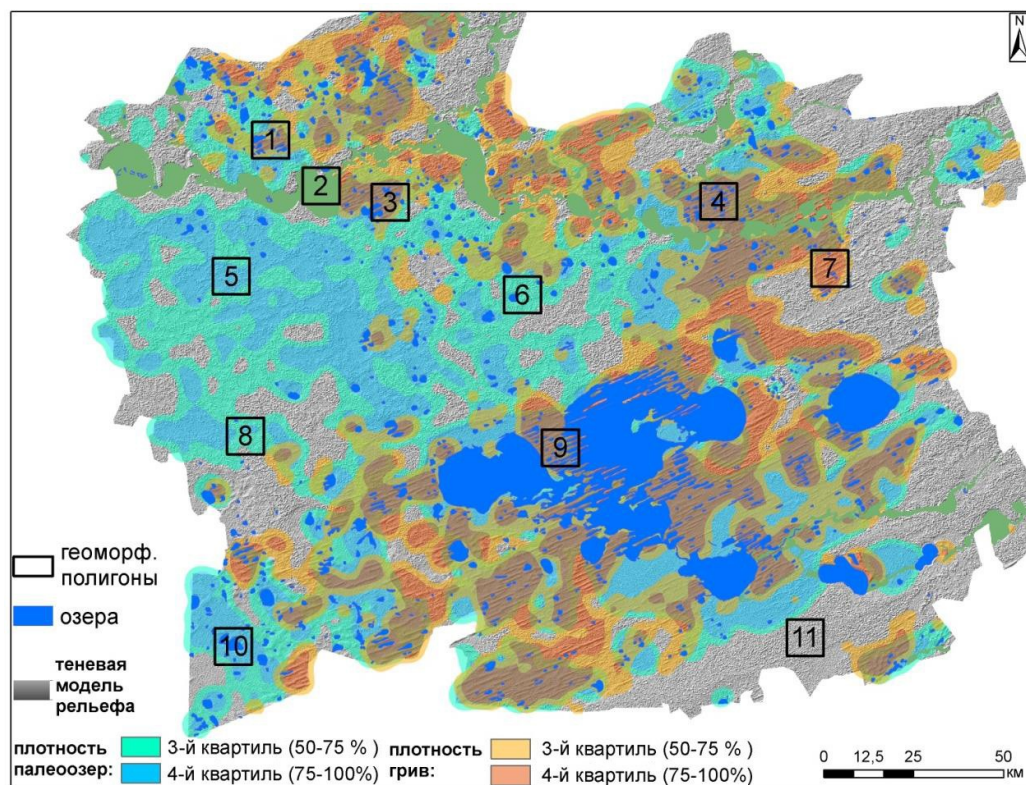


Рисунок 7.4 – Расположение геолого-геоморфологических полигонов на территории Барабы в разных условиях увлажнения

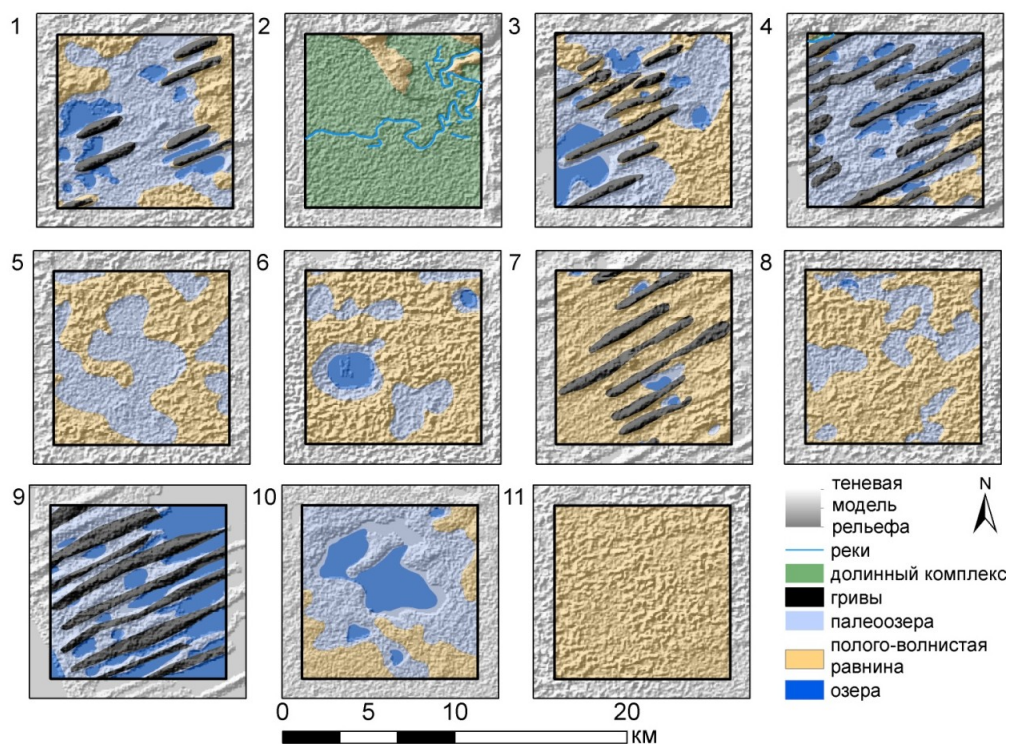


Рисунок 7.5 – Геолого-геоморфологические полигоны Барабы

Данные по соотношению геоморфологических объектов по полигонам были сведены в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Соотношение геоморфологических объектов по полигонам в разных условиях увлажнения

Геолого-геоморфологические полигоны	Объекты, %				
	долины	гивы	озера	палеозера	равнины
Участок 1. Северная часть лесостепи. Сильно заболоченные котловины палеозер. Преобладание палеозер, небольшие современные озера, мелкие гивы, полого-волнистая равнина	0,0	10,0	12,9	49,3	27,7
Участок 2. Озерное расширение речной долины. Долина (пойма + первая надпойменная терраса), узкое, сильно меандрирующее русло, старицы	90,2	0,0	2,1	0,0	7,7
Участок 3. Гривно-котловинный рельеф. Гивы, примыкающие к крупным палеозерным котловинам, частично заполненным водой, на полого-волнистой равнине	0,0	14,8	11,7	41,2	32,3
Участок 4. Северо-восточная часть Барабы. Крупные древние палеозерные котловины, занятые типичным гривно-лощинным рельефом, местами заболоченные. Палеозера, гивы, мелкие вытянутые озера, полого-волнистая равнина	0,4	27,6	9,3	53,0	9,7
Участок 5. Северо-западная часть Барабы. Обсыхающие палеозерные котловины, местами заболоченные. Палеозера, полого-волнистая равнина	0,0	0,0	0,0	44,8	55,2
Участок 6. Центральная часть Барабы. Палеозерные котловины, частично заполненные водой. Полого-волнистая равнина, палеозера, современные озера	0,0	0,0	5,5	23,1	71,4
Участок 7. Типичный гривный рельеф на полого-волнистой равнине. Полого-волнистая равнина, гивы, небольшие современные озера	0,0	18,3	1,3	2,6	77,7
Участок 8. Западная часть Центральной Барабы. Высохшие палеозерные котловины без современных озер. Палеозера, полого-волнистая равнина	0,0	0,0	0,4	27,1	72,5
Участок 9. Центральная Бараба. Озеро Чаны. Гивы в пределах крупной палеозерной котловины, местами болота и займища. Современное озеро, палеозера, гивы	0,0	35,7	31,6	32,8	0,0
Участок 10. Обсыхающие палеозера, равнина	0,0	0,0	17,0	57,4	25,6
Участок 11. Полого-волнистая равнина. Переход от Барабы к Кулунде	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0

Примечание – В таблице цветом выделены обстановки увлажнения:

умеренного увлажнения 

иссушения 

увлажнения 

Обстановки увлажнения (см. рисунок 7.5 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 полого-волнистой 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).

Обстановки умеренного увлажнения (см. рисунок 7.5, участки 2, 3, 6, 11). Для долинных ландшафтов (участок 2) характерна луговая растительность. На полого-волнистой 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 глив, а также фрагментарно на полого-волнистой равнине в зависимости от локальных флуктуаций высот.

Обстановки иссушения (см. рисунок 7.5, участки 7, 8, 10) – высохшие незаболоченные палеоозера с распространением солончаков (участок 8), обсыхающие озера на наиболее низких высотных отметках (участок 10). Такие участки характеризуются доминированием степной растительности и развитием солонцеватых лугов на месте озер. Лесная растительность отсутствует даже на гривах (участок 7).

Таким образом, построены ретроспективные модели обстановок природной среды Барабинской равнины. Показано, что они могут быть использованы как палеоаналоги для построения прогнозных моделей. Рассмотрены современные обстановки природной среды, соответствующие палеогеографическим сценариям.

7.2 Геоинформационные прогнозные модели на основе ранжирования территории по степени уязвимости к экзогенным процессам в зависимости от динамики климата

Изменения климатического увлажнения территории опасны как сами по себе, так и последствиями, поскольку могут приводить к активизации ряда экзогенных процессов (ветровая и водная эрозия почв), а также к засолению/рассолению почвенно-грунтовой толщи [143]. При смене гидрологического режима происходят изменения в растительном покрове: постепенно в зависимости от климатического тренда (иссушение/увлажнение) характерные растительные сообщества замещаются ближайшими в схеме ценозов [47]. 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. Таким образом, особое значение приобретает учет районов, где экосистемы наиболее уязвимы вследствие активизации экзогенных процессов, вызванных климатическими изменениями.

Понятие уязвимости природных систем, которое многими исследователями трактуется по-разному, является достаточно дискуссионным [141, 102]. Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК, англ. IPCC) дано следующее определение уязвимости: «...степень, до которой система подвержена отрицательным воздействиям изменения климата, включая его изменчивость и экстремумы, или не в состоянии справиться с ними. Уязвимость является функцией характера, магнитуды и скорости изменения и изменчивости климата, которым подвергнута система, ее чувствительности к ним и ее адаптационной способности» [144, с. 883]. Мы используем этот термин в его нынешнем определении МГЭИК: «Уязвимость – склонность или предрасположенность понести ущерб» [145, с. 564].

Геолого-геоморфологический каркас служит основой для схемы уязвимости территории к экзогенным процессам. Методика построения схемы наиболее уяз-

вимых территорий при активизации экзогенных процессов, обусловленных иссушением/увлажнением климата, состоит из следующих процедур: 1) выделение форм рельефа; 2) построение схемы типов рельефа; 3) разделение каждого типа рельефа на автоморфный и гидроморфный подтипы; 4) построение схемы уязвимости на основе экспертной оценки [113]. Технологическая схема показана на рисунке 7.6.

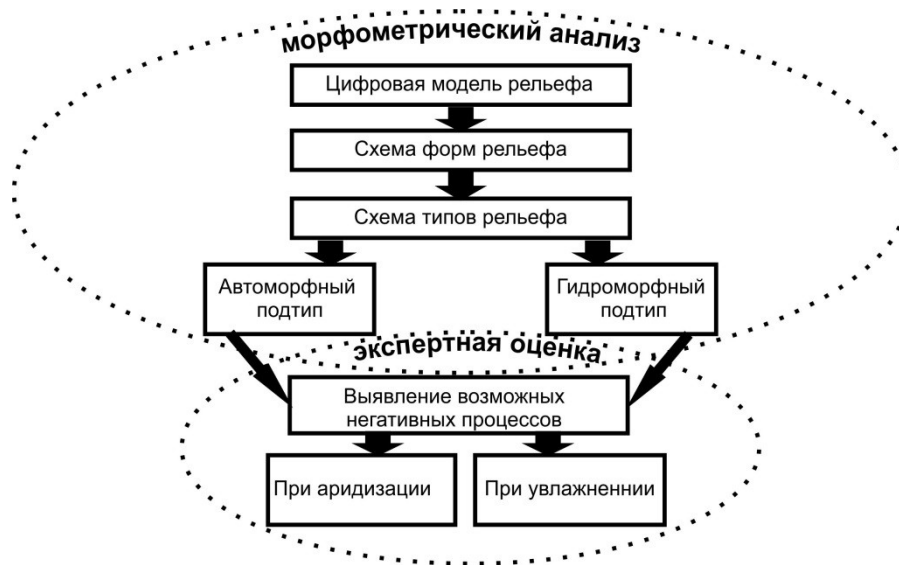


Рисунок 7.6 – Методика выявления наиболее уязвимых территорий при активизации экзогенных процессов, обусловленных иссушением/увлажнением климата

В шестом разделе описано получение контуров всех форм рельефа, выявленных на предварительном этапе: гряды, котловины, полого-волнистая равнина. При этом палеоозерные 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 котловин. Болота выделены по топографическим картам масштаба 1 : 100 000. Аллювиальный комплекс был оконтурен вручную по цифровой модели рельефа с использованием карты четвертичных отложений. Для выделения контуров лесной растительности использова-

лись база данных цифровой топографической карты миллионного масштаба и космические снимки Landsat. По соотношению удельных площадей доминирующих форм рельефа получены четыре типа рельефа: гривный, гривно-озерный, озерный и равнинный.

Разделение каждого типа рельефа на автоморфный и гидроморфный подтипы. Для учета взаимосвязи параметров рельефа и увлажнения (грунтовое и климатическое) предложен морфометрический показатель, позволяющий разделять типы рельефа на авто- и гидроморфный подтипы. Он строится на основе ЦМР как отклонение высот от тренда земной поверхности (рисунок 7.7).

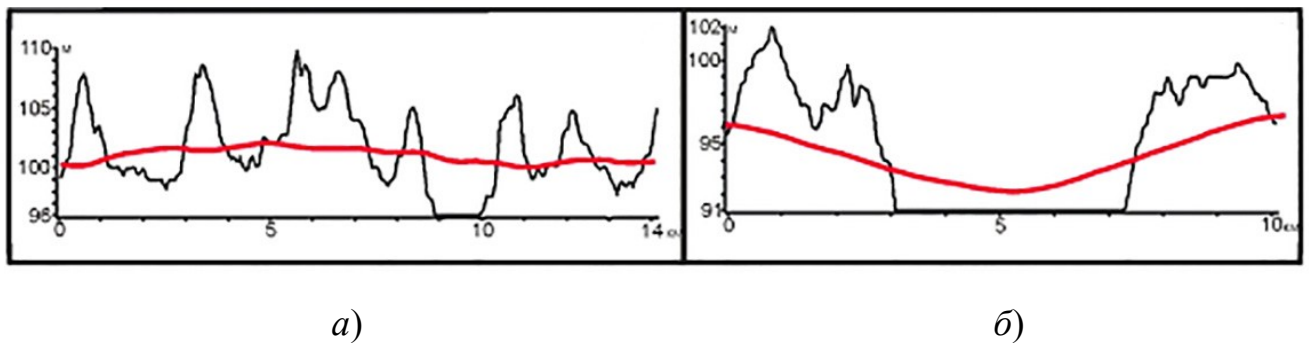


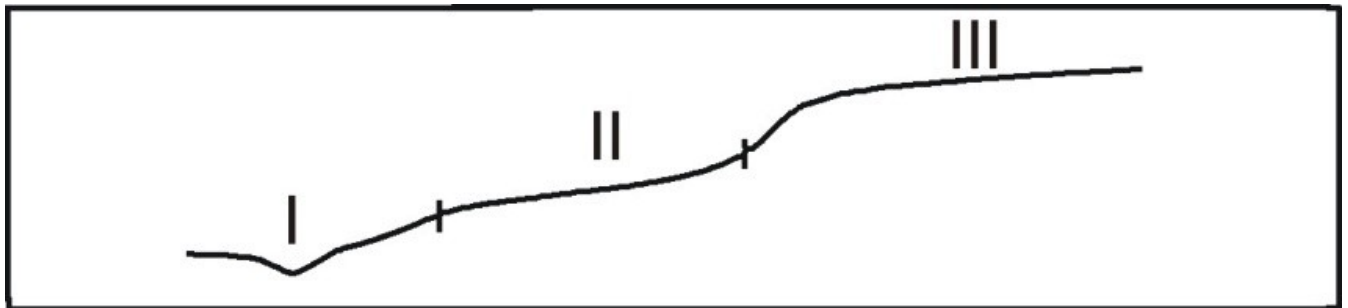
Рисунок 7.7 – Разделение на автоморфный и гидроморфный подтипы:

а) гривно-озерного рельефа; б) озерного рельефа

Сначала с помощью процедуры «Focal statistics» строится общий тренд высот определенного типа рельефа – среднее значение высот. Размер скользящего окна подбирается в зависимости от особенностей территории. В нашем случае диаметр скользящего окна составил 5 км. Затем тренд вычитается из цифровой модели рельефа. Таким образом удастся разделить рельеф на положительные формы, к которым приурочены автоморфные природно-территориальные комплексы (ПТК), и отрицательные, к которым приурочены гидроморфные ПТК, наиболее сильно подверженные влиянию условий увлажнения.

Четыре типа рельефа, развитые на исследуемой территории, а именно гривный, равнинный, гривно-озерный, озерный, изначально в указанной после-

довательности характеризуются уменьшением автоморфности и увеличением гидроморфности. Такие выводы были сделаны на основе предварительного изучения карт четвертичных отложений и объяснительных записок к ним, а также на распределении высотных отметок. Это обусловлено тем, что для ландшафтов характерна ярусность, т. е. выделение в ландшафтной структуре регионов высотно-генетических ступеней, зафиксированных в основных генетических уровнях развития рельефа [43]. На равнинах выделяются ярусы, показанные на рисунке 7.8.



I – низины с интразональными гидроморфными ландшафтами; II – низменные зональные неозювиальные ландшафты со следами гидроморфизма; III – элювиальные типичные зональные ландшафты возвышенных равнин

Рисунок 7.8 – Ярусность равнинных ландшафтов, по Л. К. Казакову [43]

Схема ранжирования территории по степени уязвимости к процессам иссушения/увлажнения. Показатель автоморфности/гидроморфности строился для четырех типов рельефа: гривного, равнинного, гривно-озерного, озерного. Гривный рельеф имеет наибольшую автоморфность и самую низкую гидроморфность, а озерный тип рельефа имеет самую высокую гидроморфность и самую низкую автоморфность. Таким образом, изначально мы получаем схему типов рельефа, разделенных на два подтипа – автоморфный и гидроморфный (рисунок 7.9).

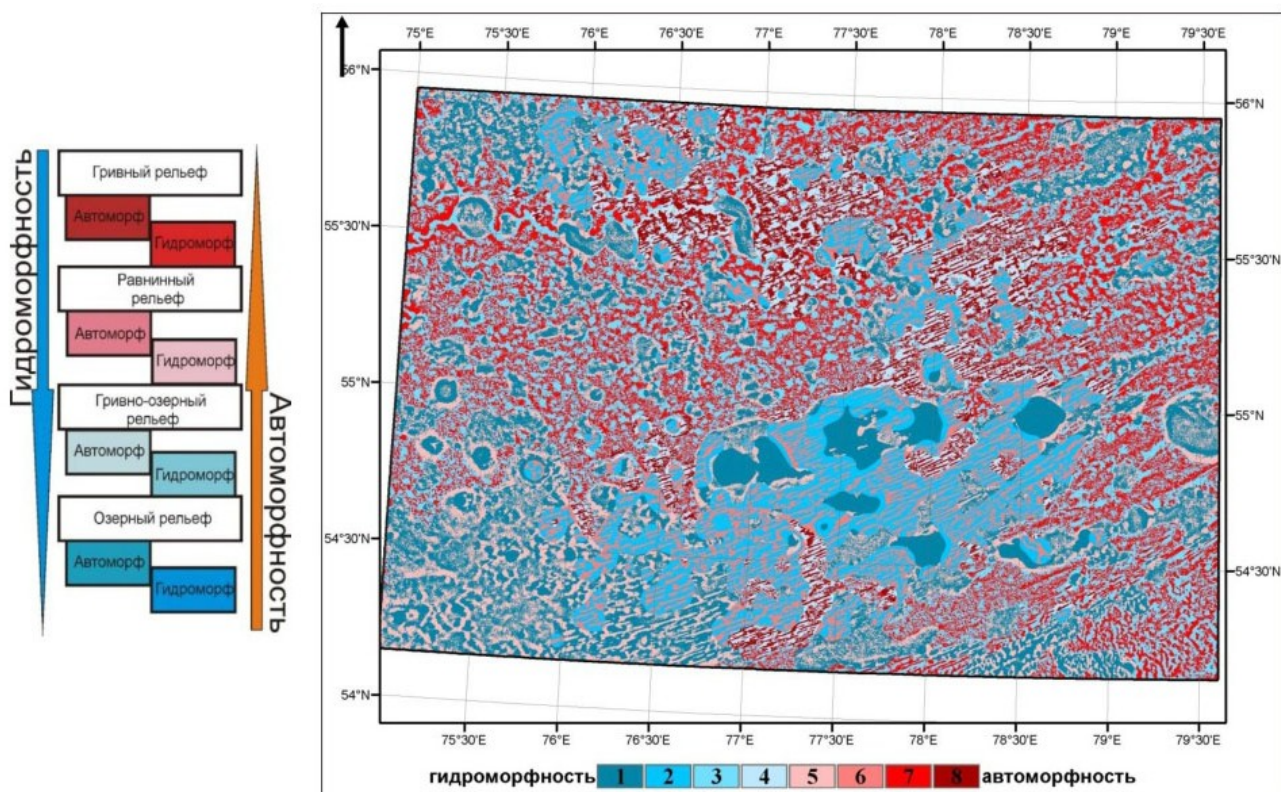


Рисунок 7.9 – Ранжирование территории по показателю
автоморфности/гидроморфности

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 аутоморфностью/гидроморфностью имеют разную степень уязвимости по отношению к процессам иссушения/увлажнения. Для того чтобы на основании этих данных получить схему уязвимости территории, необходимо рассмотреть, какие возможные экзогенные процессы могут развиваться для каждого отдельного типа и подтипа рельефа в зависимости от тренда климатических изменений (иссушение/увлажнение). Это требует привлечения экспертов из смежных областей, и на основе их оценки составляется легенда к полученной схеме.

В случае увлажнения климата на гидроморфных участках происходит более значительное повышение уровня грунтовых вод по сравнению с аутоморфными,

что в дальнейшем может приводить к заболачиванию или затоплению. Следовательно, для любого типа рельефа, выделенного нами, степень уязвимости гидроморфных участков будет выше на градацию, чем степень уязвимости автоморфных участков. С учетом нашего допущения составлена легенда для ранжирования территории по степени уязвимости к процессам увлажнения (рисунок 7.10).

↑ Автоморфность типов рельефа	Автоморфный подтип	Гидроморфный подтип	Гидроморфность типов рельефа ↓
	грядный рельеф		
	очень слабо уязвимый	слабо уязвимый	
	равнинный рельеф		
	слабо уязвимый	средне уязвимый	
	грядно-озерный рельеф		
	средне уязвимый	сильно уязвимый	
	озерный рельеф		
	сильно уязвимый	очень сильно уязвимый	

Рисунок 7.10 – Легенда к специальной карте ранжирования территории Барабинской низменности по степени уязвимости к процессам увлажнения

Увеличение аридности климата вызывает другой набор возможных экзогенных процессов и будет иметь иное площадное распространение уязвимых территорий. Легенда для специальной карты ранжирования территории по степени уязвимости к процессам аридизации приведена на рисунке 7.11.

Автоморфный подтип		Гидроморфный подтип	
грядный рельеф			
сильно уязвимый деградация растительного покрова с последующим развитием дефляционных и водно-эрозионных процессов		средне уязвимый дополнительное атмосферное увлажнение снижает степень уязвимости	
равнинный рельеф			
средне уязвимый уменьшение продуктивности растительных сообществ, снижение проективного покрытия растительности и её почвозащитной роли		слабо уязвимый понижение уровня грунтовых вод, изменение степени и химизма засоления почвенно-грунтовой толщи, возможна трансформация почвенно-растительного покрова	
грядно-озерный рельеф			
средне уязвимый уменьшение продуктивности растительных сообществ, снижение проективного покрытия растительности и её почвозащитной роли		сильно уязвимый сокращение площадей озёр, увеличение площадей солончаков и сильно засоленных почв, дефляционные и водно-эрозионные процессы	
озерный рельеф			
сильно уязвимый дефляционные и водно-эрозионные процессы		очень сильно уязвимый деградация озёр, вплоть до полного высыхания, увеличение площадей солончаков и сильно засоленных почв, значительная активизация дефляционных и водно-эрозионных процессов	

Гидроморфность типов рельефа ↓

↑ Автоморфность типов рельефа

Автоморфность типов рельефа ↑

Гидроморфность типов рельефа ↓

Рисунок 7.11 – Легенда к специальной карте ранжирования территории Барабинской низменности по степени уязвимости к процессам аридизации

При аридизации наиболее негативными процессами на территории Барабы могут быть: деградация гидроморфных участков, вплоть до полного высыхания современных озер и появления на их месте солончаков и сильно засоленных почв; развитие дефляционных и водно-эрозионных процессов на не закрепленных растительностью поверхностях [143]. Автоморфные участки в этом случае также дестабилизируются. На них может происходить уменьшение продуктивности растительных сообществ, снижение проективного покрытия растительности и ее почвозащитной роли и, как следствие, активизация дефляционных процессов, водной эрозии (при сильных ливневых осадках из-за экстремальности климата). Масштаб проявления этих процессов для разных типов рельефа и их подтипов может значительно различаться. Однако при тренде иссушения увеличение степени уязвимости различных типов рельефа, особенно гидроморфных участков в них, не так равнозначно, как в случае с трендом увлажнения.

Полученные схемы ранжирования территории по степени уязвимости при активизации экзогенных процессов, обусловленных иссушением, представлены в приложении Б, а увлажнением климата – в приложении В.

Таким образом, природно-территориальные комплексы на различных типах и подтипах рельефа Барабинской равнины по-разному реагируют на динамику климатического увлажнения в зависимости от его тренда [18]. При положительном тренде увлажнения степень уязвимости территорий с различным типом рельефа возрастает в такой последовательности: гривный, равнинный, гривно-озерный, озерный. При аридизации климата сильно уязвимыми становятся автоморфные поверхности гривного рельефа, а также озерный рельеф в целом. Наименее уязвимыми являются территории с равнинным рельефом. Для них прогнозируется слабая и средняя степень уязвимости как при аридизации, так и при увлажнении. 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.

Выводы по седьмому разделу

Четвертый уровень (наиболее полный уровень знаний о рельефе) позволяет рассматривать рельеф как абиотическую составляющую геосистем. Исследование на данном уровне предполагает анализ функционального значения конкретных форм и типов рельефа, учитывает их динамические и статические свойства как геолого-геоморфологической основы природно-территориальных комплексов. Комплексование этих данных с данными по биотическим компонентам делает возможным ретроспективное и прогнозное моделирование геосистем. Подход апробирован на примере Барабинской равнины, для которой построены: 1) геоинформационные ретроспективные модели на основе сочетания геологической (палеогеографической) и археологической информации с данными по геолого-геоморфологическому каркасу; 2) геоинформационные прогнозные модели на основе ранжирования территории по степени уязвимости к экзогенным процессам в зависимости от динамики климата.

Подход к прогнозу динамики геосистем на основе исследования ее геолого-геоморфологической основы предполагает выявление биотических и абиотических индикаторов, характеризующих обстановки природной среды в зависимости от климатических ситуаций. Зная, как на динамику климатических ситуаций реагируют биотические компоненты геосистем (в частности, растительность) и как они меняют свою приуроченность к различным компонентам геолого-геоморфологической основы ландшафтов, можно осуществлять как ретроспективное, так и прогнозное моделирование природных обстановок в регионе.

Рассмотренная методика разработана прежде всего для 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 адаптация данной методики к местным условиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования поставленная цель, направленная на разработку методики геоинформационного картографирования форм и типов рельефа в рамках морфогенетического подхода (на примере районов юга Западной Сибири), достигнута.

Итоги проведенного исследования заключаются в следующем:

- рассмотрена история развития и становления геоинформационного картографирования, выполнен анализ работ предшественников в области картографирования рельефа;
- составлена технологическая схема, которая позволяет рассматривать методику картографирования рельефа в зависимости от полноты знаний о его историко-генетических характеристиках и разработать набор технологических приемов для каждого случая;
- разработана методика геоинформационного моделирования районов земной поверхности, удовлетворяющих условиям, задающимся пользователем. Методика показала свою эффективность в решении конкретных задач прогноза в смежных с геоморфологией областях исследования;
- разработана методика однопараметрической и многопараметрической классификации гомогенных типов рельефа по морфометрическим показателям. Результаты ее применения рассмотрены на примере Чуйской межгорной котловины, территория которой разделена на 10 типов рельефа;
- разработана методика геоинформационного картографирования гетерогенных типов рельефа по соотношению доминирующих форм рельефа в скользящем окне. Результаты ее применения рассмотрены на примере Барабинской равнины, территория которой разделена на четыре типа рельефа;
- разработана методика ретроспективного и прогнозного картографирования на основе геоморфологических баз данных. Результаты ее применения рассмотрены на примере Барабинской равнины.

Полученные результаты могут быть использованы органами местного самоуправления Новосибирской области и Алтайского края для разработки рекомендаций по оптимизации хозяйственного использования земель, прогнозу неблагоприятных природных и природно-техногенных явлений и планированию защитных мероприятий.

Перспективы дальнейших исследований состоят в совершенствовании методики и ее точности, а также в адаптации ее к территориям с другой спецификой рельефа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Анализ пространственного распределения археологических памятников центральной части Барабинской лесостепи (Венгеровский район Новосибирской области) на основе ГИС-технологий [Текст] / Я. В. Кузьмин, И. Д. Зольников, О. И. Новикова, Н. В. Глушкова, Д. А. Чупина, О. В. Софеев, Д. Е. Ануфриев, В. Н. Дементьев // Вестник Новосибирского гос. ун-та. Сер.: История, филология. – 2013. – Т. 12, № 7. – С. 87–96.
- 2 Баранский, Н. Н. Экономическая картография [Текст] / Н. Н. Баранский, А. И. Преображенский. – М. : Географгиз, 1962. – 284 с.
- 3 Берлянт, А. М. Виртуальные геоизображения [Текст] / А. М. Берлянт. – М. : Научный мир, 2001. – 56 с.
- 4 Берлянт, А. М. Геоиконика [Текст] / А. М. Берлянт. – М. : Астрей, 1996. – 208 с.
- 5 Берлянт, А. М. Образ пространства: карта и информация [Текст] / А. М. Берлянт. – М. : Мысль, 1986. – 240 с.
- 6 Берлянт, А. М. Картография [Текст] : учебник для вузов / А. М. Берлянт. – М. : Аспект Пресс, 2002. – 336 с.
- 7 Бородавко, П. С. Эволюция Чуйско-Курайской лимносистемы в позднем неоплейстоцене [Текст] : автореф. дис. ... канд. географ. наук : 25.00.25 / Бородавко Павел Станиславович. – Томск, 2003. – 22 с.
- 8 Бочаров, М. К. Математико-статистические методы в картографии [Текст] / М. К. Бочаров, С. А. Николаев. – М. : Геодезиздат, 1957. – 158 с.
- 9 Брагин, П. Н. Морфодинамический анализ как метод для целей градостроительного планирования [Текст] / П. Н. Брагин // Ярославский педагогический вестник. – 2004. – № 1–2. – С. 166–177.
- 10 Будыко, М. И. Эволюция биосферы [Текст] / М. И. Будыко. – Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 487 с.

- 11 Бутаков, Г. П. Рельеф как одно из условий ведения хозяйства [Текст] / Г. П. Бутаков, В. И. Мозжерин, О. П. Ермолаев // Зеленая книга Республики Татарстан : сб. статей. – Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1993. – С. 36–45.
- 12 Верещака, Т. В. Основная карта России [Текст] / Т. В. Верещака // Природа. – 2012. – № 9. – С. 32–38.
- 13 Винокуров, Ю. И. Ландшафтные индикаторы инженерно- и гидрогеологических условий Предалтайских равнин [Текст] / Ю. И. Винокуров. – Новосибирск : Наука, 1980. – 192 с.
- 14 Волков, И. А. Роль эолового фактора в эволюции рельефа [Текст] / И. А. Волков // Проблемы экзогенного рельефообразования. Кн. 1 : Рельеф ледниковый, криогенный, эоловый, карстовый и морских побережий. – М. : Наука, 1976. – С. 264–288.
- 15 Гедымин, А. В. Географическая карта как средство труда [Текст] / А. В. Гедымин // Вопросы географии. Сб. 34: Картография. – М. : Географгиз, 1954. – С. 81–93.
- 16 Географический энциклопедический словарь [Текст] / под ред. А. Ф. Трешникова, Э. Б. Алаева, П. М. Алампиева и др. – М. : Сов. энциклопедия, 1988. – 432 с.
- 17 Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов [Текст] / Ю. Б. Баранов, А. М. Берлянт, Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарев, Б. Б. Серапинас, Ю. А. Филиппов. – М. : ГИС-Ассоциация, 1999. – 205 с.
- 18 Геоинформационное картографирование территории по реакции к иссушению и увлажнению (юг Западно-Сибирской равнины) [Текст] / Д. А. Чупина, И. Д. Зольников, Е. Н. Смоленцева, Н. Н. Лашинский, А. В. Никулина, А. А. Картозия // Изв. РАН. Серия географическая. – 2018. – № 5. – С. 81–90.
- 19 Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200 000. Серия Горно-Алтайская. М-45-XXIII, XXIX [Текст] : пояснительная записка / М. А. Черноморский, З. В. Мусиенко, Н. П. Трифонов, О. А. Раковец. – М. : Недра, 1965. – 77 с.

- 20 Геоморфологический словарь-справочник [Текст] / сост. Л. М. Ахромеев ; под ред. П. Г. Шевченкова. – Брянск : Изд-во Брянского гос. ун-та, 2002. – 320 с.
- 21 Герасимов, И. П. Опыт геоморфологической интерпретации общей схемы геологического строения СССР [Текст] / И. П. Герасимов // Проблемы физической географии. – 1946. – № 12. – С. 33–46.
- 22 ГИС-моделирование условий обитания, благоприятных для проживания древнего человека в горах Алтая [Текст] / И. Д. Зольников, А. В. Постнов, В. А. Лямина, В. С. Славинский, Д. А. Чупина // Археология, этнография и антропология Евразии. – 2013. – № 3 (55). – С. 40–47.
- 23 Глобальные цифровые модели рельефа [Электронный ресурс] : справочный раздел // Геоматика. – 2015. – № 3. – С. 78–82. – Режим доступа: <https://sovzond.ru/upload/iblock/090/78-82.pdf>.
- 24 Голиков, А. П. Математические методы в географии [Текст] / А. П. Голиков, И. Г. Черванев, А. М. Трофимов. – Харьков : Вища шк. : Изд-во при Харьковском ун-те, 1986. – 144 с.
- 25 Гроссвальд, М. Г. Евразийские гидросферные катастрофы и оледенение Арктики [Текст] / М. Г. Гроссвальд. – М. : Научный мир, 1999. – 117 с.
- 26 Гук, А. П. Формирование картографических изображений в среде ГИС [Текст] / А. П. Гук, С. С. Дышлюк, Е. В. Павлов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 222–227.
- 27 Девяткин, Е. В. Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая [Текст] / Е. В. Девяткин // Труды ГИН АН СССР. – Вып. 126. – М. : Наука, 1965. – 243 с.
- 28 Деев, Е. В. Неотектоническое районирование северо-запада Горного Алтая на основе морфометрического анализа цифровой модели рельефа [Текст] / Е. В. Деев, Д. А. Чупина // VIII Всероссийское совещание по изучению четвертичного периода «Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований» : сб. статей (г. Ростов-на-Дону, 10–15 июня 2013 г.). – Ростов н/Д. : Изд-во ЮНЦ РАН, 2013. – С. 162–164.

- 29 Деревянко, А. П. Палеолит Чуйской котловины [Текст] / А. П. Деревянко, С. В. Маркин. – Новосибирск : Наука, 1987. – 113 с.
- 30 Динамическая геоморфология [Текст] : учеб. пособие / под ред. Г. С. Ананьева, Ю. В. Симонова, А. И. Спиридонова. – М. : Изд-во МГУ, 1992. – 448 с.
- 31 Дышлюк, С. С. К вопросу формализации процесса создания тематических карт в ГИС-среде [Текст] / С. С. Дышлюк, О. Н. Николаева, Л. Н. Ромашова // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 78–85.
- 32 Дьяконов, К. Н. Современные методы географических исследований [Текст] / К. Н. Дьяконов, Н. С. Касимов, В. С. Тикунов. – М. : Просвещение : АО «Учебная литература», 1996. – 207 с.
- 33 Ерицян, Г. Г. Сравнение цифровых моделей рельефа, полученных с топографических карт масштаба 1 : 50 000, 1 : 100 000 и 1 : 200 000 с ЦМР SRTM [Текст] / Г. Г. Ерицян // Изв. НАН РА. Науки о Земле. – 2013. – Т. 66, № 1. – С. 39–47.
- 34 Ермолов, В. В. Вопросы составления геоморфологических карт при среднемасштабной комплексной геоморфологической съемке северных регионов [Текст] / В. В. Ермолов. – Л., 1958. – 32 с. – (Труды Научно-исследовательского института геологии Арктики, Т. 83).
- 35 Ефремов, Ю. К. Опыт морфографической классификации элементов и простых форм рельефа [Текст] / Ю. К. Ефремов // Вопросы географии. – 1949. – № 11. – С. 47–64.
- 36 Заруцкая, И. П. Методы составления рельефа на гипсометрических картах [Текст] / И. П. Заруцкая. – М. : Изд-во геодез. лит-ры, 1958. – 216 с.
- 37 Зинченко, А. Г. Методика геоморфологического картографирования шельфа и континентального склона Российской Федерации (применительно к задачам Госгеолкарты-1000) [Текст] / А. Г. Зинченко, А. Н. Ласточкин. – М. : ЗАО «Геоинформмарк», 2001. – 38 с.
- 38 Зольников, И. Д. Новые данные о четвертичном морфолитогенезе в Чуйской котловине (Горный Алтай) [Текст] / И. Д. Зольников, Е. В. Деев, В. А. Лямина // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 4. – С. 437–449.

39 Зольников, И. Д. Четвертичные отложения и рельеф долин Чуи и Катунни [Текст] / И. Д. Зольников, А. А. Мистрюков. – Новосибирск : Параллель, 2008. – 180 с.

40 Индикация динамики природно-территориальных комплексов юга Западной Сибири в связи с изменениями климата [Текст] / И. Д. Зольников, Н. В. Глушкова, В. А. Лямина, Е. Н. Смоленцева, А. Ю. Королук [и др.] // География и природные ресурсы. – 2011. – № 2. – С. 155–160.

41 Использование ЦМР для решения задач четвертичной геологии и геоморфологии Сибири [Текст] / Н. В. Глушкова, В. А. Лямина, И. Д. Зольников, Н. Н. Добрецов, В. П. Афанасьев [и др.] // Квартер во всем его разнообразии. Фундаментальные проблемы, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований : материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. – Апатиты ; СПб., 2011. – Т. 1 (А–К). – С. 131–134.

42 К вопросу о стратиграфическом положении палеолитических памятников вдоль Чуйского тракта в долинах Чуи и Катунни [Текст] / А. В. Постнов, И. Д. Зольников, С. А. Гуськов, Л. М. Чевалков // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий : материалы Годовой сессии Ин-та археологии и этнографии СО РАН 2007 г. – Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2007. – Т. XIII. – С. 149–155.

43 Казаков, Л. К. Ландшафтоведение с основами ландшафтного планирования [Текст] / Л. К. Казаков. – М. : Изд. центр «Академия», 2008. – 336 с.

44 Картографирование и мониторинг процессов аридизации на юге Западно-Сибирской равнины [Текст] / Н. В. Глушкова, Д. А. Чупина, Д. В. Пчельников, И. И. Болдырев, Н. А. Селяницкая // География и природные ресурсы. – 2016. – № 1. – С. 133–140.

45 Картография в России: преемственность традиций и новые задачи [Текст] / Н. Н. Комедчиков, А. Н. Краюхин, В. П. Савиных, В. С. Тикунов // Геодезия и картография. – 2011. – № 1. – С. 23–27.

46 Картография. Зарубежные концепции и направления исследований [Текст] : сб. переводных статей. Вып. 1. – М. : Прогресс, 1983. – 278 с.

- 47 Королук, А. Ю. Проявление динамики экосистем в пространственной структуре растительного покрова на юге Западной Сибири [Текст] / А. Ю. Королук // Растительный мир Азиатской России. – 2010. – № 2 (6). – С. 12–16.
- 48 Кулик, Н. А. Геология, петрография и минералогия в археологических исследованиях [Текст] / Н. А. Кулик, А. В. Постнов // Методы наук о Земле и Человеке в археологических исследованиях : учеб. пособие. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 2010. – С. 39–99.
- 49 Ласточкин, А. Н. Геоморфологические исследования при поиске и разведке железо-марганцевых конкреций [Текст] / А. Н. Ласточкин // Советская геология. – 1985. – № 12. – С. 70–83.
- 50 Ласточкин, А. Н. Использование морфологической системы картографирования подводного рельефа [Текст] / А. Н. Ласточкин, Э. Н. Акопов // Технология топографического картографирования шельфа : сб. науч. трудов ЦНИИГАиК / под. ред. Б. Н. Морозова. – М., 1988. – С. 114–143.
- 51 Ласточкин, А. Н. Рельеф земной поверхности (Принципы и методы статической геоморфологии) [Текст] / А. Н. Ласточкин. – Л. : Недра, 1991. – 340 с.
- 52 Ласточкин, А. Н. Систематика и связь форм и рисунков земной поверхности [Текст] / А. Н. Ласточкин // Материалы Иркутского геоморфологического семинара. – Иркутск, 1999. – С. 29–30.
- 53 Ласточкин, А. Н. Системно-морфологическое основание наук о Земле (Геотопология, структурная география и общая теория геосистем) [Текст] / А. Н. Ласточкин. – СПб. : Изд-во НИИХ СПбГУ, 2002. – 762 с.
- 54 Левина, Т. П. Климатические ритмы голоцена юга Западной Сибири [Текст] / Т. П. Левина, Л. А. Орлова // Геология и геофизика. – 1993. – № 3. – С. 37–50.
- 55 Лисицкий, Д. В. Использование возможностей применения современных редакторов трехмерной графики и анимации в картографии [Текст] / Д. В. Лисицкий, П. Ю. Бугаков // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 1, ч. 2. – С. 127–131.

56 Лопатин, Д. В. Петербургская школа геоморфологического картографирования К. К. Маркова и ее современное развитие [Текст] / Д. В. Лопатин, И. А. Сытина, Д. А. Нефёдов // Вестник СПбГУ. Сер. 7. – 2014. – Вып. 2. – С. 190–195.

57 Лоскутов, Ю. И. Классификация геоморфологических карт [Текст] / Ю. И. Лоскутов, В. Ф. Филатов // Геоморфологическое картирование. – М. : Наука, 1978. – С. 42–46.

58 Лурье, И. К. Основы геоинформационного картографирования [Текст] : учеб. пособие / И. К. Лурье. – М. : Изд-во Московского ун-та, 2000. – 143 с.

59 Лютый, А. А. Язык карты: сущность, система, функции [Текст] / А. А. Лютый. – М. : ИГ АН СССР, 1988. – 292 с.

60 Марков, К. К. О геоморфологической карте [Текст] / К. К. Марков // Геологический вестник. – 1929. – Вып. 1–3, Т. 7. – С. 34–41.

61 Мартысевич, У. В. Использование средств ГИС и ДЗ для морфотектонического анализа и выделения крупных сейсмогравитационных структур (на примере юго-восточной части Горного Алтая) [Текст] / У. В. Мартысевич, Е. В. Деев, Е. А. Бурчк // Тезисы докладов Третьей Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле. – Новосибирск : Изд-во ОИГГМ СО РАН, 2006. – С. 155–159.

62 Методика использования ГИС-технологий для анализа пространственной локализации поселений на примере эпох бронзы, раннего железного века, средневековья в центральной части Барабинской низменности [Текст] / А. В. Никулина, И. Д. Зольников, Я. В. Кузьмин, О. В. Софеев, Д. А. Чупина, Н. В. Глушкова, Д. В. Пчельников // Вестник Томского гос. ун-та. – 2018. – № 428. – С. 5–13.

63 Мехбалиев, М. М. Методика составления карты энергии рельефа [Текст] / М. М. Мехбалиев // Геоморфология. – 2009. – № 4. – С. 45–52.

64 Мусин, О. Р. Цифровые модели рельефа континуальных и дискретных географических полей [Текст] / О. Р. Мусин, С. Н. Сербенюк // Банки географиче-

ских данных для тематического картографирования / под ред. К. А. Салищева. – М. : МГУ, 1987. – С. 156–170.

65 Николаевская, Е. М. Морфометрические карты рельефа [Текст] / Е. М. Николаевская. – М. : Изд-во МГУ, 1966. – 30 с.

66 Новаковский, Б. А. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей [Текст] / Б. А. Новаковский, С. В. Прасолов, А. И. Прасолова. – М. : Научный мир, 2003. – 64 с.

67 Об изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России в XX веке [Текст] / Г. В. Груза, М. Ю. Бардин, Э. Я. Ранькова, Э. В. Рочева, Ю. Ю. Соколов [и др.] // Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. – М. : Наука, 2001. – С. 18–39.

68 Палеогеография Западно-Сибирской равнины в эпоху позднезырянского ледникового максимума [Текст] / С. А. Архипов, В. И. Астахов, И. А. Волков, В. С. Волкова, В. А. Панычев. – Новосибирск : Наука, 1980. – 110 с.

69 Пенк, В. Морфологический анализ [Текст] / В. Пенк. – М. : Географгиз, 1961. – 324 с.

70 Пластинин, Л. А. Морфосистемное картографирование экзогенных геологических процессов Байкальской горной страны [Текст] / Л. А. Пластинин, В. П. Ступин // Геодезия и картография. – 2013. – № 10. – С. 17–21.

71 Погорелов, А. В. Опыт автоматизированной идентификации элементов морфологической структуры Большого Кавказа [Текст] / А. В. Погорелов, Е. С. Бойко, П. Б. Нетребин // Инженерные изыскания. – 2010. – № 5. – С. 32–35.

72 Погорелов, А. В. Рельеф бассейна р. Кубани: Морфологический анализ [Текст] / А. В. Погорелов, Ж. А. Думит. – М. : ГЕОС, 2009. – 208 с.

73 Правда, Я. Картографический язык [Текст] / Я. Правда // Картография. Зарубежные концепции и направления исследований : сб. переводных статей. Вып. 1. – М. : Прогресс, 1983. – С. 66–75.

74 Преображенский, В. С. О чем спорят географы? [Текст] / В. С. Преображенский // Науки о Земле. – 1990. – № 6. – 48 с.

75 Природная среда и человек в палеолите Горного Алтая [Текст] / А. П. Деревянко, М. В. Шуньков, А. К. Агаджанян, Г. Ф. Барышников, Е. М. Малаева [и др.]. – Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2003. – 448 с.

76 Природно-климатические изменения в Западной Сибири к 2000 г. [Текст] / С. А. Архипов, В. С. Волкова, В. А. Бахарева, М. Р. Вотах, Т. П. Левина, С. К. Кривоногов, Л. А. Орлова // Геология и геофизика. – 1994. – Т. 35, № 1. – С. 3–21.

77 Разработка теоретико-методологических основ геоинформационного картографирования [Электронный ресурс] : отчет о НИР/НИОКР / А. М. Берлянт, Т. В. Собчук, З. М. Латышева, А. Р. Аляутдинов, Н. С. Сербенюк [и др.]. – М., 1998. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=755179>.

78 Результаты разведки памятников палеолита в Алтайском крае и Республике Алтай в 2011 году [Текст] / В. С. Славинский, А. В. Постнов, Г. И. Марковский, Н. В. Басова, И. Д. Зольников, Е. П. Рыбин // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий : материалы итоговой сессии Ин-та археологии и этнографии СО РАН 2011 г. – Новосибирск : Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2011. – Т. XVII. – С. 469–472.

79 Русанов, Г. Г. Максимальный уровень Чуйского ледниково-подпрудного озера в Горном Алтае [Текст] / Г. Г. Русанов // Геоморфология. – 2008. – № 1. – С. 65–71.

80 Салищев, К. А. Задачи картографии в СССР в свете решений XIX съезда Коммунистической партии Советского Союза [Текст] / К. А. Салищев // Вопросы географии. Сб. 34: Картография. – М. : Географгиз, 1954. – С. 3–14.

81 Салищев, К. А. Задачи картографии и автоматизация [Текст] / К. А. Салищев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1967. – № 4. – С. 7–10.

82 Салищев, К. А. Картография [Текст] : учеб. для географ. спец. ун-тов / К. А. Салищев. – М. : Высшая школа, 1982. – 271 с.

83 Салищев, К. А. Предмет и метод картографии (некоторые современные взгляды) [Текст] / К. А. Салищев // Вестник МГУ. Сер.: География. – 1970. – № 2. – С. 29–33.

- 84 Саушкин, Ю. Г. Экономическая география: история, теория, методы, практика [Текст] / Ю. Г. Саушкин. – М. : Мысль, 1973. – 559 с.
- 85 Сваткова, Т. Г. Перспективы развития географической картографии [Текст] / Т. Г. Сваткова // Геодезия и картография. – 2013. – № 1. – С. 14–20.
- 86 Селиверстов, Ю. П. Морфология рельефа и геоморфологической катены [Текст] / Ю. П. Селиверстов // Морфология рельефа : материалы Иркутского геоморфологического семинара. – Иркутск, 1999. – С. 11–13.
- 87 Симонов, Ю. Г. Объяснительная морфометрия рельефа [Текст] / Ю. Г. Симонов. – М. : ГЕОС, 1999. – 263 с.
- 88 Соотношение эпигерцинского и позднекайнозойского структурных планов западной части Горного Алтая [Текст] / Е. В. Деев, С. В. Зиновьев, Б. М. Чиков, И. С. Новиков, Е. А. Вишневская, Е. М. Высоцкий // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы науч. совещания. – Иркутск : Изд-во ИГ СО РАН, 2003. – С. 69–72.
- 89 Спиридонов, А. И. Геоморфологическое картографирование [Текст] / А. И. Спиридонов. – М. : Географгиз, 1952. – 186 с.
- 90 Степанов, И. Н. Теория пластики рельефа и новые тематические карты [Текст] / И. Н. Степанов. – М. : Наука, 2006. – 230 с.
- 91 Ступин, В. П. Интеграция альтернативных возможностей отображения рельефа в интересах геодинамического картографирования [Текст] / В. П. Ступин // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 1, ч. 2. – С. 176–181.
- 92 Ступин, В. П. Картографирование морфосистем [Текст] / В. П. Ступин. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2009. – 160 с.
- 93 Ступин, В. П. Концепция морфосистем как методологическая основа картографирования селевой опасности [Текст] / В. П. Ступин, Л. А. Пластинин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : 8-я Международная конференция «Раннее предупреждение и управление в кризисных ситуациях в эпоху

"Больших данных"» : сб. материалов (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 43–48.

94 Ступин, В. П. Особенности картографического моделирования морфосистем равнинных территорий [Текст] / В. П. Ступин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 59–62.

95 Сулова, Е. Г. Методика создания геоботанической карты степного участка по полевым обследованиям с применением геоинформационных технологий (на примере «ямской степи» заповедника «Белогорье») [Текст] / Е. Г. Сулова, Н. А. Алексеенко, А. С. Шаповалов // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Сер.: Естественные науки. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 12–24.

96 Сущность мультимедийной картографии [Текст] / Д. В. Лисицкий, Е. В. Комиссарова, Е. С. Утробина, А. А. Колесников, Т. С. Сизикова // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 2. – С. 31–36.

97 Татарников, А. Н. Разработка методики определения информационной емкости карты [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.33 / Татарников Андрей Николаевич. – М., 2002. – 24 с.

98 Тематическое и атласное картографирование: современное состояние и перспективы [Текст] / Н. С. Касимов, В. М. Котляков, Т. В. Котова, В. С. Тикунов // Геодезия и картография. – 2012. – № 11. – С. 40–47.

99 Теоретические основы поверхностей [Электронный ресурс] // Справочная информация ArcGIS. – Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/fundamentals-of-3d-surfaces.htm>. – Загл. с экрана.

100 Тимофеев, Д. А. Морфология рельефа: попытка определения содержания понятий [Текст] / Д. А. Тимофеев // Морфология рельефа : материалы Иркутского геоморфологического семинара. – Иркутск, 1999. – С. 7–8.

101 Уфимцев, Г. Ф. Вокруг понятия и термина о морфологии рельефа [Текст] / Г. Ф. Уфимцев // Морфология рельефа : материалы Иркутского геоморфологического семинара. – Иркутск, 1999. – С. 13–15.

102 Уязвимость к изменению климата: Молдавская часть бассейна Днестра [Текст] : монография / Р. Коробов, И. Тромбицкий Г. Сыродоев, А. Андреев ; Междунар. ассоциация хранителей реки Есо-TIRAS. – Кишинев : Elan Poligraf, 2014. – 336 с.

103 Философов, В. П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур [Текст] / В. П. Философов. – Саратов : Изд-во Саратовского ун-та, 1960. – 69 с.

104 Флоринский, И. В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию [Электронный ресурс] / И. В. Флоринский // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. – 2016. – Т. 11, № 1. – Режим доступа: http://j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/PDF-files/2227-9490e-aprov_r_e-ast11-1.2016.71.pdf.

105 Хорошилов, В. С. Эффекты анимации в пользовательских интерфейсах с позиций картографии [Текст] / В. С. Хорошилов, Е. В. Комиссарова, А. А. Колесников // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2-1. – С. 113–115.

106 Червяков, В. А. Дискретный и континуальный подходы к картографированию морфометрии рельефа [Текст] / В. А. Червяков, Е. П. Крупочкин // ИнтерКарто/ИнтерГИС. – 2004. – Т. 10. – С. 43–48.

107 Червяков, В. А. Концепция поля в современной картографии [Текст] / В. А. Червяков. – Новосибирск : Наука, 1978. – 150 с.

108 Чупина, Д. А. Автоматическое выделение форм и комплексов рельефа на основе морфометрического ГИС-анализа (на примере Венгеровского района Новосибирской области) [Текст] / Д. А. Чупина // Геоморфология. – 2014. – № 3. – С. 43–50.

109 Чупина, Д. А. Влияние процессов иссушения/увлажнения на ландшафтные предпочтения человека на территории Барабы в голоцене [Текст] /

Д. А. Чупина, А. В. Никулина, А. А. Картозия // Пути эволюционной географии : материалы Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А. А. Величко (Москва, 23–25 ноября 2016 г.). – М. : Институт географии РАН, 2016. – С. 739–744.

110 Чупина, Д. А. Геоинформационное картографирование форм и типов рельефа на основе морфометрического анализа [Текст] / Д. А. Чупина, И. Д. Зольников // Геодезия и картография. – 2016. – № 6. – С. 35–43.

111 Чупина, Д. А. Геоморфологические индикаторы процессов увлажнения/иссушения на юге Западно-Сибирской равнины [Текст] / Д. А. Чупина, Н. В. Глушкова, С. А. Котлер // Геоморфология и картография : материалы XXXIII Пленума Геоморфологической комиссии РАН. – Саратов : Изд-во Саратовского ун-та, 2013. – С. 470–473.

112 Чупина, Д. А. ГИС-картографирование морфокомплексов на основе морфометрических характеристик и управляемых классификаций [Текст] / Д. А. Чупина, И. Д. Зольников, В. А. Лямина // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2012. – № 2. – С. 96–103.

113 Чупина, Д. А. Методика выявления наиболее уязвимых территорий при активизации экзогенных процессов, обусловленных динамикой климатического увлажнения (на основе ГИС и ДЗ) [Текст] / Д. А. Чупина, И. Д. Зольников, Е. Н. Смоленцева // ИнтерКарто/ИнтерГИС. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 93–104.

114 Шарая, Л. С. Изучение пространственной организации лесных экосистем с помощью методов геоморфометрии [Текст] / Л. С. Шарая, П. А. Шарый // Экология. – 2011. – № 1. – С. 3–10.

115 Шарый, П. А. О методе вторых производных в геологии [Текст] / П. А. Шарый, И. Н. Степанов // Доклады АН СССР. – 1991. – Т. 319, № 2. – С. 456–460.

116 Щукин, И. С. Общая геоморфология. В 3 т. Т. 1 [Текст] / И. С. Щукин. – М. : Изд-во МГУ, 1960. – 616 с.

117 Эволюция историко-картографического метода исследования исторических процессов в связи с применением мультимедийных методов [Текст] /

Д. В. Лисицкий, М. Н. Колоткин, Е. В. Комиссарова, В. А. Ракунов, А. А. Колесников, А. В. Фишер // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 3, ч. 1. – С. 118–121.

118 A generic procedure for automatically segmenting land-forms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic [Text] / R. A. MacMillan, W. W. Pettapiece, S. C. Nolan, T. W. Goddard // Fuzzy Set and Systems. – 2000. – № 113. – P. 81–109.

119 A high accuracy map of global terrain elevations [Text] / D. Yamazaki, D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2017. – V. 44. – P. 5844–5853.

120 A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product [Text] / F. E. O'Loughlin, R. C. D. Paiva, M. Durand, D. E. Alsdorf, P. D. Bates // Remote Sensing of Environment. – 2016. – № 182. – P. 49–59.

121 Berry, P. A. M. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry [Text] / P. A. M. Berry, J. D. Garlick, R. G. Smith // Remote Sensing of Environment. – 2007. – № 106. – P. 17–27.

122 Blaschke, T. Defining landscape units through integrated morphometric characteristics [Text] / T. Blaschke, J. Strobl // Landscape Modelling: Digital Techniques for Landscape Architecture / Buhman E., Ervin S. (eds.). – Wichmann-Verlag, Heidelberg, 2003. – P. 104–113.

123 Brown, D. G. Supervised classification of types of glaciated landscapes using digital elevation data [Text] / D. G. Brown, D. P. Lusch, K. A. Duda // Geomorphology. – 1998. – № 21. – P. 233–250.

124 Bui, E. Soil survey as a knowledge system [Text] / E. Bui // Geoderma. – 2003. – V. 120, № 1–2. – P. 17–26.

125 Burrough, P. A. High resolution landform classification using fuzzy-k means [Text] / P. A. Burrough, P. F. M. van Gaans, R. A. MacMillan // Fuzzy Sets and Systems. – 2000. – V. 113, Is. 1. – P. 37–52.

126 Carabajal, C. C. ICESat validation of SRTM C-band digital elevation models [Text] / C. C. Carabajal, D. J. Harding // *Geophysical research letters*. – 2005. – V. 32, Is. 22. – doi:10.1029/2005GL023957.

127 Clarke, J. I. *Morphometry from Maps* [Text] / J. I. Clarke // *Essays in Geomorphology*. – London : Heinemann, 1966. – P. 235–274.

128 Computer-assisted discrimination of morphological units on north-central Crete (Greece) by applying multivariate statistics to local relief gradients [Text] / A. O. Adedirana, I. Parcharidis, M. Poscolier, K. Pavlopoulos // *Geomorphology*. – 2004. – № 58. – P. 357–370.

129 Correction of interferometric and vegetation biases in the SRTMGL1 spaceborne DEM with hydrological conditioning towards improved hydrodynamics modeling in the Amazon Basin [Text] / S. Pinel, M. P. Bonnet, J. Santos Da Silva, D. Moreira, S. Calmant [et al.] // *Remote Sensing*. – 2015. – № 7 (12). – P. 16108–16130.

130 Cox, N. J. Kinds and problems of geomorphological explanation [Text] / N. J. Cox // *Geomorphology*. – 2007. – V. 88, Is. 1. – P. 46–56.

131 De Ruyver, R. DEM optimization for hydrological modelling using SRTM for the “Pantanal” region, Brazil [Electronic resource] / R. De Ruyver // Enschede, Netherlands: International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation. – 2004. – ITC: 55. – Mode of access: https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2004/msc/wrem/de_ruyver.pdf.

132 Deng, Y. New trends in digital terrain analysis: landform definition, representation, and classification [Text] / Y. Deng // *Progress in Physical Geography*. – 2007. – № 31. – P. 405–419.

133 Evans, I. S. *General Geomorphometry, Derivations of Altitude, and Descriptive Statistics* [Text] / I. S. Evans // *Spatial Analysis in Geomorphology*. – London : Methuen, 1972. – P. 17–90.

134 Evans, I. S. *Geomorphometry and landform mapping: What is a landform?* [Text] / I. S. Evans // *Geomorphology*. – 2012. – № 137. – P. 94–106.

135 Fuzzy k-means classification of topo-climatic data as an aid to forest mapping in the Greater Yellowstone Area, USA [Text] / P. A. Burrough, J. P. Wilson, P. F. M. van Gaans, A. J. Hansen // *Landscape Ecology*. – 2001. – V. 16. – P. 523–546.

136 Gallant, J. Enhancing the SRTM data for Australia, Proc [Text] / J. Gallant, A. Read // *Geomorphometry*. – 2009. – № 31. – P. 149–154.

137 Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico [Text] / A. Bolongaro-Crevenna, V. Torres-Rodriguez, V. Sorani, D. Frame, M. A. Ortiz // *Geomorphology*. – 2005. – № 67. – P. 407–422.

138 Geomorphometry: Concepts, Software, Applications [Text] : Developments in Soil Science / T. Hengl, H.I. Reuter (eds.). – Amsterdam etc. : Elsevier, 2009. – V. 33. – 772 p.

139 GIS and Remote Sensing Data-Based Methods for Monitoring Water and Soil Objects in the Steppe Biome of Western Siberia / I. D. Zolnikov, N. V. Glushkova, E. N. Smolentseva, D. A. Chupina, D. V. Pchel'nikov, V. A. Lyamina // *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.

140 Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: First results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm [Text] / M. Hansen, R. S. DeFries, J. R. G. Townshend, M. Carroll, C. Dimiceli, R. A. Sohlberg // *Earth Interactions*. – 2003. – V. 7, № 10. – P. 1–15.

141 Hinkel, J. Indicators of vulnerability and adaptive capacity: Towards a clarification of the science-policy interface [Text] / J. Hinkel // *Global Environmental Change*. – 2011. – V. 21. – P. 198–208.

142 Horton, R. E. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins, Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology [Text] / R. E. Horton // *Geological Society of America Bulletin*. – 1945. – № 56 (3). – P. 275–370.

143 Indicators of desertification in the Kulunda steppe in the south of Western Siberia [Text] / B. C. Meyer, V. Schreiner, E. N. Smolentseva, B. A. Smolentsev // *Archives of Agronomy and Soil Science*. – 2008. – V. 54, № 6. – P. 585–603.

144 IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Text] / M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson (eds.). – Cambridge : Cambridge University Press, 2007. – 976 p.

145 IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Text] : A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) / C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, P. M. Midgley (eds.). – Cambridge : Cambridge University Press, 2012. – 582 p.

146 Irwin, B. J. Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin [Text] / B. J. Irwin, S. J. Ventura, B. K. Slater // *Geoderma*. – 1997. – № 77. – P. 137–154.

147 Iwahashi, J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature [Text] / J. Iwahashi, R. J. Pike // *Geomorphology*. – 2007. – № 86. – P. 409–440.

148 Jasiewicz, J. Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms [Text] / J. Jasiewicz, T. F. Stepinski // *Geomorphology*. – 2013. – № 182. – P. 147–156.

149 Krcho, J. Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory [Text] / J. Krcho // *Acta Geographica Universitatis Comniana, Geographico-Physica*. – 1983. – № 1. – P. 7–223.

150 MacMillan, R. A. Automated knowledge-based classification of landforms, soils, and ecological spatial entities [Electronic resource] / R. A. MacMillan. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/301701700_Automated_knowledge-based_classification_of_landforms_soils_and_ecological_spatial_entities.

151 MacMillan, R. A. Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modeling using digital elevation models (DEMs) [Text] / R. A. MacMillan,

R. K. Jones, D. H. McNabb // Computers, Environment and Urban Systems. – 2004. – № 28 (3). – P. 175–200.

152 Mapping forest canopy height globally with spaceborne LiDAR [Electronic resource] / M. Simard, N. Pinto, J. B. Fisher, A. Baccini // Journal of Geophysical Research – Biogeosciences. – 2011. – V. 116 (G4), G04021. – Mode of access: <https://doi.org/10.1029/2011JG001708>.

153 Paiva, R. C. D. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach [Text] / R. C. D. Paiva, W. Collischonn, C. E. M. Tucci // Journal of Hydrology. – 2011. – V. 406, № 3–4. – P. 170–181.

154 Pike, R. J. Geomorphometry: A Brief Guide [Text] / R. J. Pike, I. S. Evans, T. Hengl // Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science / Hengl T., Reuter H. I. (eds.). – Amsterdam etc. : Elsevier, 2009. – V. 33. – Chapter 1. – P. 3–30.

155 Pike, R. J. The geometric signature: Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models [Text] / R. J. Pike // Mathematical Geology. – 1988. – № 20. – P. 491–510.

156 Rudorff, C. M. Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: 1. Hydraulic controls on water elevation, inundation extent, and river-floodplain discharge [Text] / C. M. Rudorff, J. M. Melack, P. D. Bates // Water Resources Research. – 2014. – № 50. – P. 619–634.

157 Shary, P. A. Fundamental Quantitative Methods of Land Surface Analysis [Text] / P. A. Shary, L. S. Sharaya, A. V. Mitusov // Geoderma. – 2002. – V. 107, Is. 1–2. – P. 1–32.

158 SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy [Text] / C. A. Baugh, P. D. Bates, G. Schumann, M. A. Trigg // Water Resources Research. – 2013. – № 49 (9). – P. 5276–5289.

159 Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps [Text] / O. D. A. Prima, A. Echigo, R. Yokoyama, T. Yoshida // Geomorphology. – 2006. – № 78. – P. 373–386.

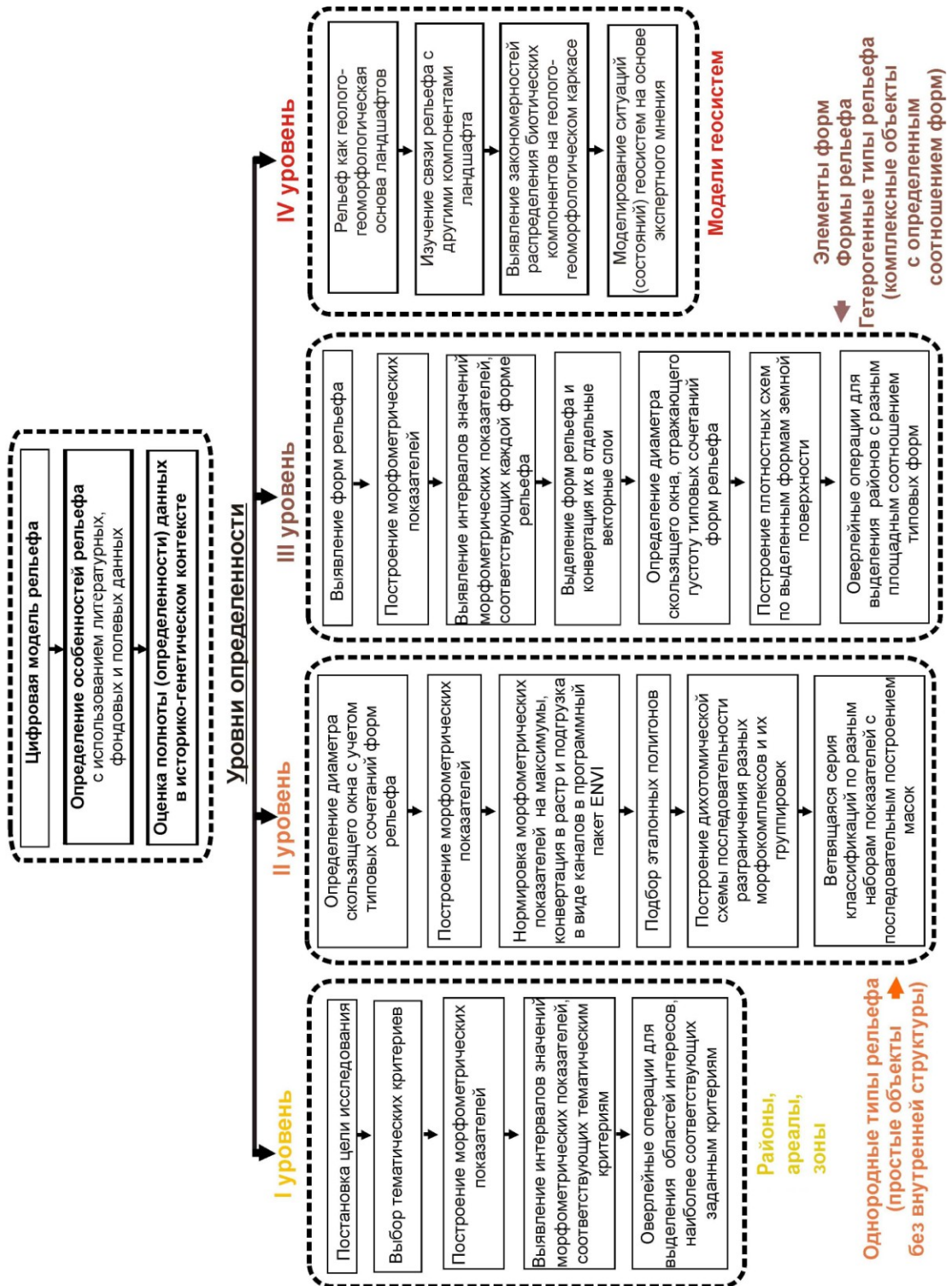
160 The Shuttle Radar Topography Mission [Electronic resource] / T. G. Farr [et al.] // Review of Geophysics. – 2007. – № 45. – Mode of access: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.

161 Validation of the ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) Version 2 over the Conterminous United States [Electronic resource] : Report to the ASTER GDEM Version 2 Validation Team / D. Gesch, M. Oimoen, Z. Zhang, J. Danielson, D. Meyer. – Mode of access: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B4/143/2016/isprs-archives-XLI-B4-143-2016.pdf>.

162 Wood, J. D. Scale-based characterisation of digital elevation models [Text] / J. D. Wood // Innovations in GIS 3 / D. Parker (eds.). – London : Taylor and Francis, 1996. – P. 163–176.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

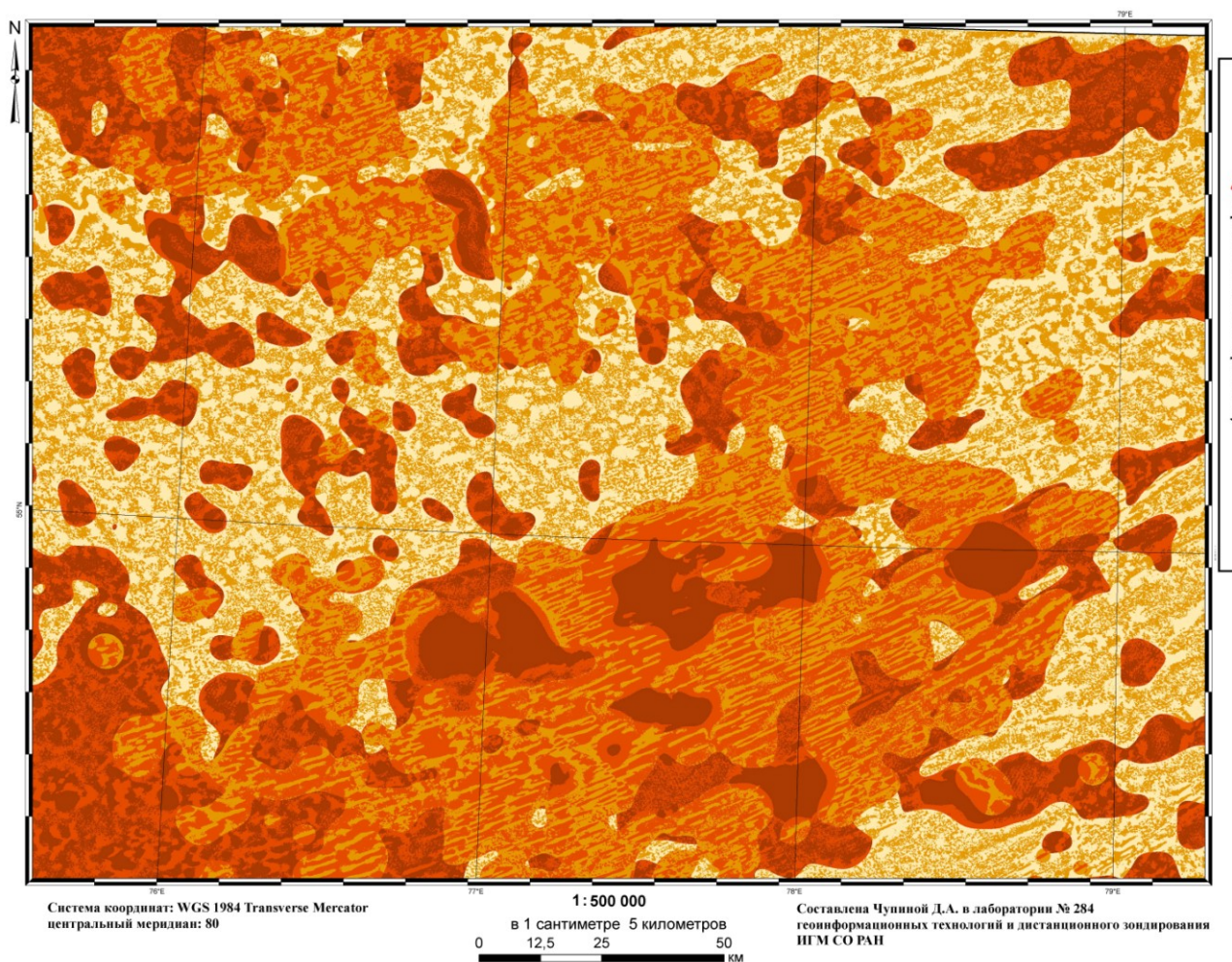
(обязательное)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА МЕТОДИКИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО
КАРТОГРАФИРОВАНИЯ В РАМКАХ МОРФОГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

СПЕЦИАЛЬНАЯ КАРТА РАНЖИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ
БАРАБИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ ПО СТЕПЕНИ УЯЗВИМОСТИ
ПРИ АКТИВИЗАЦИИ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ
АРИДИЗАЦИЕЙ КЛИМАТА



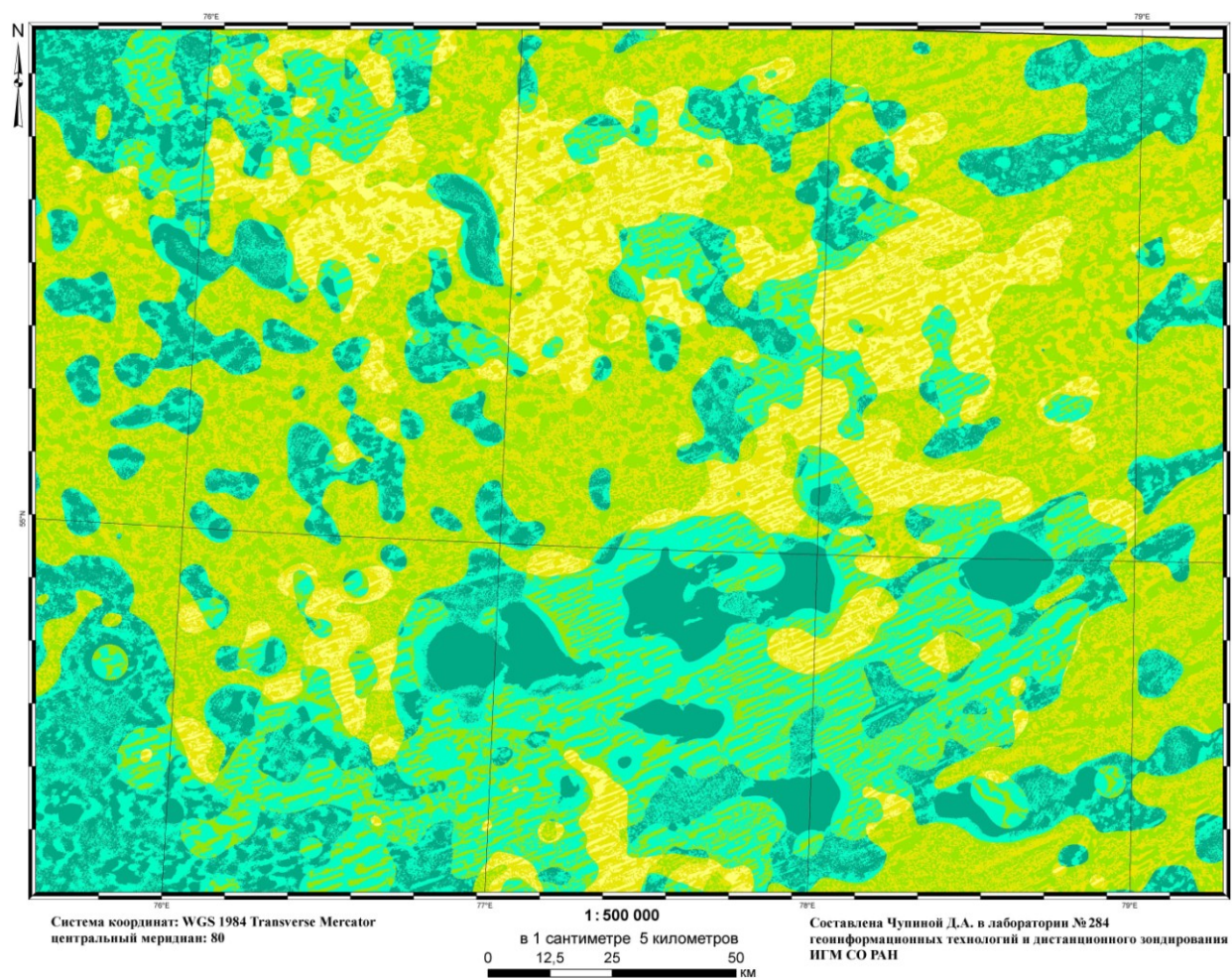
Легенда

Автоморфность типов рельефа ↑	Автоморфный подтип		Гидроморфный подтип		Гидроморфность типов рельефа ↓
	грядный рельеф				
	сильно уязвимый деградация растительного покрова с последующим развитием дефляционных и водно-эрозийных процессов		средне уязвимый дополнительное атмосферное увлажнение снижает степень уязвимости		
	равнинный рельеф				
	средне уязвимый уменьшение продуктивности растительных сообществ, снижение проективного покрытия растительности и её почвозащитной роли		слабо уязвимый грунтовые воды уйдут глубже, что снижает вероятность засоления, возможна трансформация почвенно-растительного покрова		
	грядно-озерный рельеф				
	средне уязвимый уменьшение продуктивности растительных сообществ, снижение проективного покрытия растительности и её почвозащитной роли		сильно уязвимый сокращение площадей озёр, возможно образование солончаков, дефляционные и водно-эрозийные процессы		
	озерный рельеф				
	сильно уязвимый дефляционные и водно-эрозийные процессы		очень сильно уязвимый деградация озёр, вплоть до полного высыхания с последующим развитием солончаков, дефляционных и водно-эрозийных процессов		

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

СПЕЦИАЛЬНАЯ КАРТА РАНЖИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ
БАРАБИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ ПО СТЕПЕНИ УЯЗВИМОСТИ
ПРИ АКТИВИЗАЦИИ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ
ГУМИДИЗАЦИЕЙ КЛИМАТА



Легенда

автоморфность типов рельефа ↑	Автоморфный подтип	Гидроморфный подтип	гидроморфность типов рельефа ↓
	гивный рельеф		
	очень слабо уязвимый	слабо уязвимый	
	равнинный рельеф		
	слабо уязвимый	средне уязвимый	
	гивно-озерный рельеф		
	средне уязвимый	сильно уязвимый	
	озерный рельеф		
	сильно уязвимый	очень сильно уязвимый	