

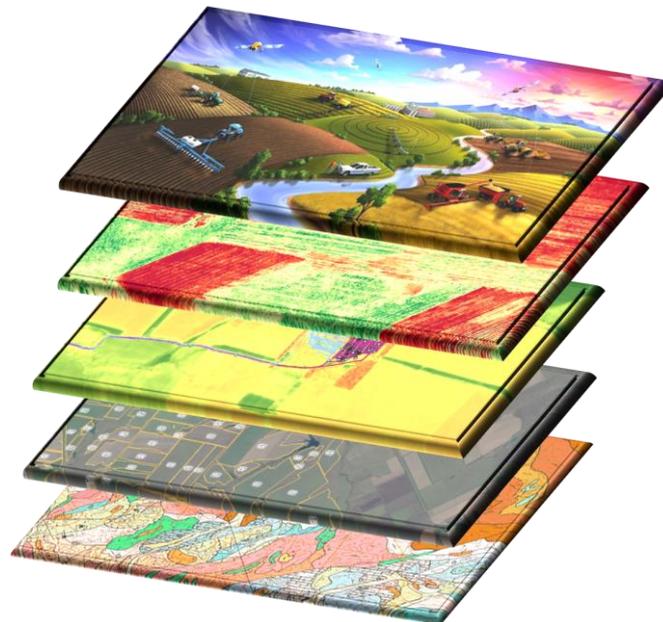
МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –  
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА

О.С. Ермолаева, А.М. Зейлигер, А.В. Греченева

**РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ АПК.  
АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-  
ВРЕМЕННЫХ НАБОРОВ ДАННЫХ**

*Учебное пособие*



Москва

РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

2023

УДК 528.94: 338.436.33: 330.43 (075.8)

ББК 26.191: 65.051: 65.32-21

Е 74

*Рецензенты: Дорوفеев Н.В., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Управление и контроль в технических системах» МИ ВлГУ и Перминов А.В., к.т.н., доцент, и.о. заведующий кафедрой «Гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами» РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева*

Е 74 **Ермолаева, О.С.** Разработка геоинформационных систем для предприятий АПК. Анализ пространственно-временных наборов данных: Учебное пособие / О.С. Ермолаева, А.М. Зейлигер, А.В. Греченева; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. – Москва : РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2023. - 90 с. – Текст : электронный.

ISBN 978-5-9675-2019-8

DOI 10.26897/978-5-9675-2019-8-2023-90

В учебном пособии рассматриваются вопросы анализа пространственно-временных данных с помощью инструментария геоинформационных систем, приведены основные определения, практическое приложение представлено на учебных примерах, основанных на реальных пространственных данных. Подход, используемый в представленном пособии, позволяет студенту проводить анализ и связывать применяемые методы и инструменты геоинформатики с изучаемыми понятиями других учебных дисциплин.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 09.03.03 «Прикладная информатика», направленностей «ИТ-решения для бизнеса» и «Системы искусственного интеллекта», преподавателей вузов, студентов ряда специальностей инженерного профиля всех форм обучения.

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией институту экономики и управления АПК, протокол №1 от 28 августа 2023 г.

**Ermolaeva O.S.** Development of geoinformation systems for agricultural enterprises. Analysis of spatiotemporal datasets: textbook / O.S. Ermolavea, A.M. Zeiliger, A.V Grecheneva; Russian state agrarian University- Moscow state Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev. – Moscow: RSAU-MTAA named after K. A. Timiryazev, 2023. - 90 p. – Text: electronic.

The textbook discusses the issues of spatial and temporal data analysis using the tools of geoinformation systems, provides basic definitions; practical application is presented on educational examples based on real spatial data. The approach used in the presented manual allows the student to analyze and link the applied methods and tools of geoinformatics with the concepts studied in other academic disciplines.

The textbook is intended for students of higher educational institutions studying in the direction of 09.03.03 "Applied Informatics", directions "IT solutions for business" and "Artificial intelligence systems", university teachers, students of a number of engineering specialties of all forms of education.

УДК 528.94: 338.436.33: 330.43 (075.8)

ББК 26.191: 65.051: 65.32-21

© Ермолаева О.С., Зейлигер А.М.,

Греченева А.В., 2023

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА

имени К.А. Тимирязева, 2023

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АПК	-	Агропромышленный комплекс
БГД	-	База геоданных
ГИС	-	Географическая информационная система
ГНСС	-	Глобальные навигационные спутниковые системы
ДЗЗ	-	Дистанционное зондирование Земли
ИИ	-	Искусственный интеллект
ОВР	-	Интерполяция по методу обратно взвешенных расстояний
ПК	-	Персональный компьютер
ПО	-	Программное обеспечение
САПР	-	Система автоматизированного проектирования
СУБД	-	Система управления базой данных
ТС	-	Таблица содержания
ЦМР	-	Цифровая модель рельефа
API	-	Application Programming Interface, набор правил и протоколов, который позволяет разным программам взаимодействовать друг с другом
ILWIS	-	Открытое ПО ГИС
Linux OS	-	Операционная система Линукс для Юникс-подобных операционных систем
Mac OS	-	Операционная система компании Макинтош
Microsoft	-	Операционная система компании Майкрософт
Windows	-	
QGIS	-	Открытое ПО ГИС
QGIS	-	Свободно распространяемое ГИС POWVV
SRTM	-	Shuttle radar topographic mission (SRTM) – радарная топографическая съемка
TIN	-	Триангуляционная нерегулярная сеть

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>6</b>
<b>ПРЕДИСЛОВИЕ К УПРАЖНЕНИЯМ .....</b>	<b>6</b>
Программная среда пособия.....	7
Требования к компьютеру и данным.....	7
Необходимые навыки .....	7
Цели упражнений.....	7
Требования к отчету .....	7
Процедура выполнения упражнений.....	8
<b>РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ</b>	
<b>9</b>	
Геоинформационные системы.....	12
Пространственно-временной анализ наборов геоданных в ГИС .....	15
Векторная и растровая модели в ГИС .....	15
Векторная модель географических данных .....	17
Растровая модель географических данных .....	19
Векторный анализ данных в ГИС .....	21
Растровый анализ данных в ГИС .....	25
<b>РАЗДЕЛ 2. .... УПРАЖНЕНИЕ. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПРИВЯЗКА</b>	
<b>ИСТОРИЧЕСКОГО АЭРОФОТОСНИМКА ТИМИРЯЗЕВСКОЙ</b>	
<b>АКАДЕМИИ В QGIS .....</b>	<b>27</b>
Цель упражнения: .....	27
Задачи упражнения: .....	27
Исходные данные:.....	27
Введение .....	27
Метод .....	28
Задание.....	29
Контрольные вопросы к упражнению: .....	42
<b>РАЗДЕЛ 3. .... УПРАЖНЕНИЕ. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ</b>	
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ В</b>	
<b>QGIS                    44</b>	
Цель упражнения: .....	44
Задачи упражнения: .....	44
Исходные данные:.....	44
Введение .....	45
Метод .....	46
Задание.....	46
Контрольные вопросы к упражнению: .....	61

**РАЗДЕЛ 4. . УПРАЖНЕНИЕ. ПРОВЕДЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО  
АНАЛИЗА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА SRTM В  
QGIS 62**

Цель упражнения .....	62
Задачи упражнения: .....	62
Исходные данные:.....	62
Введение .....	62
Цифровые модели рельефа .....	67
Метод .....	72
Задание .....	72
Контрольные вопросы к упражнению: .....	87

<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>88</b>
--------------------------------------	-----------

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

В данном учебном пособии представлены учебные материалы, посвященные использованию технологии геоинформационных систем (ГИС) для анализа пространственно-временных данных. Современные потребности использования ГИС для задач агропромышленного комплекса основаны на их уникальной способности не только интегрировать и анализировать большие объемы разнообразной информации, включая геопространственные данные о географических объектах, процессах, явлениях и их взаимосвязях, но также и прогнозировать потенциальные экономические, экологические и прочие последствия для целей поддержки принятия эффективных решений.

Динамичное развитие аграрного производства требует внедрения современных технологий сбора и обработки информации, необходимых для решения многочисленных производственных и управленческих задач. Использование ГИС позволяет эффективно применять геопространственные данные, совместно использовать их на разных уровнях реализации ГИС-проектов, начиная от локального уровня, включая местный, региональный и национальный, и заканчивая глобальным. Реализации такого рода задач способствует уникальная особенность современных ГИС-приложений, обеспечивающая комплексное использование геопространственных данных об объектах и связанной с ними деятельности на основе их наглядного картографического отображения и пространственного анализа.

## **ПРЕДИСЛОВИЕ К УПРАЖНЕНИЯМ**

Освоив материалы, представленные в этом учебном курсе и, тщательно выполняя предложенные в них упражнения, студенты получают навыки работы в среде программного обеспечения (ПО) QGIS и познакомятся с применением геоинформационных систем (ГИС) для задач АПК.

## **Программная среда пособия**

В процессе создания заданий этого руководства было использовано ПО QGIS. ПО QGIS – свободно распространяемая программа, поддержка и разработка которой осуществляется сообществом. Скачать ПО QGIS можно с официального сайта - <https://qgis.org/ru/site/forusers/download.html>. На выбор предлагается несколько вариантов и версий для установки. ПО QGIS можно установить на Windows, macOS, Linux, Android and iOS. На официальном сайте доступны варианты установки из исходного кода и с помощью готового установочного пакета.

### **Требования к компьютеру и данным**

Для выполнения упражнений необходимо иметь доступ к персональному компьютеру или к рабочей станции с установленной программой QGIS.

### **Необходимые навыки**

Предполагается, что обучающийся обладает опытом работы в среде Windows, а также с приложением MS Excel, MS Word.

### **Цели упражнений**

- ✓ закрепить, углубить и расширить теоретические знания, умения и навыки, полученные в процессе теоретического обучения ГИС;
- ✓ познакомить обучающегося с ПО QGIS и помочь приобрести навыки работы в данном ПО;
- ✓ помочь приобрести навыки работы с различными видами и источниками данных в ГИС;
- ✓ познакомить обучающегося с примерами применения ГИС для задач, связанных с сельским хозяйством.

### **Требования к отчету**

В процессе работы над упражнениями Вам будет нужно создать специальные файлы ГИС-проектов в среде ПО QGIS. В имени проекта необходимо прописывать Вашу фамилию для восстановления, в случае

необходимости, утерянных или испорченных файлов. Имена проектам необходимо задавать используя латиницу.

По каждому упражнению должен быть сформирован отчет в текстовом редакторе MS Word, оформление которого производится в соответствии с ГОСТ 7.32–2001, ГОСТ 7.12–93, ГОСТ 7.1–2003, ГОСТ 7.82–2001. В отчете должен быть отражен ход выполнения упражнения, его ключевые моменты, подкрепленные рисунками-отображениями экрана, сделанными в ходе выполнения работы.

В отчете должны быть приведены ответы на проверочные вопросы по упражнениям. Ответы необходимо приводить в развернутой форме со ссылкой на раздел и вопрос. Для подкрепления хода своего рассуждения при ответе на заданный вопрос Вы свободны в выборе средств и можете приводить доказательства, результаты вычислений, формулы, диаграммы и примеры.

### **Процедура выполнения упражнений**

Предлагаемые пошаговые процедуры выполнения упражнений позволят Вам успешно их выполнить и получить запланированный результат. Обучающимся рекомендуется подойти к упражнению творчески и поэкспериментировать с данными для лучшего усвоения предложенного материала и навыков работы с ПО QGIS.

## РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ

На современном этапе трансформации традиционной экономики в цифровую экономику ее происходят обновления, которые во многом связаны с изменениями в реализации технологических и управленческих процессов за счет применения цифровых технологий. В свою очередь это вызывает необходимость разработки новых подходов и методов решения задач, связанных с ведением сельского хозяйства, рациональным использованием природных ресурсов, охраной окружающей среды и др.

Агропромышленный комплекс (АПК) является гарантом экономического суверенитета и продовольственной безопасности страны; при этом, в управлении АПК применяются те же общеэкономические подходы, что и в других отраслях. Однако большинство объектов АПК характеризуется важными пространственными характеристиками, которые к тому же меняются во времени. Например, характеристики объектов, зависящие от таких свойств, как рельеф и почвенный покров, считаются стационарными, а такие характеристики, как погода и технология обработки, - динамичными. Оба типа характеристик, отражающих вариации природно-климатических и антропогенных воздействий на региональном и локальном уровнях, являются факторами, влияющими не только на характеристики производственных объектов агропромышленного сектора, но и на пространственно-временную вариацию их экономических показателей. При этом в отличие от объектов, не имеющих характеристик, зависящих от пространственных координат и, описываемых традиционными непространственными наборами данных, для объектов с характеристиками, зависящими от местоположения, используются пространственные наборы данных, называемые геоданными. Поэтому использование наборов геоданных является принципиальным отличием цифровой трансформации агропромышленного сектора и диктует необходимость применения

специальных знаний, навыков и компетенций для принятия эффективных решений по получению, сбору, обработке, анализу геоданных, использованию методов управления ими. В настоящее время в результате многочисленных научно-технических исследований в области применения и использования геоданных в агропромышленном секторе сформировались четыре направления взаимосвязанных и взаимодополняющих технологий, сокращенно ГИС-ДЗЗ-ГНСС-ИИ.

Ряд производственных задач АПК связан с мониторингом, управлением и контролем многочисленных процессов в ходе производства, перевозки, хранения, переработки и поставки сельскохозяйственной продукции. Одним из современных и эффективных технических средств цифровой реализации, применяемых в ходе решения такого рода задач, являются геоинформационные системы. Их развитие позволило реализовать переход от малопродуктивного, ручного анализа геоданных, представленных на бумажных носителях, к автоматизированному геопространственному анализу картографических данных, формируемых на цифровой картографической основе.

В последние годы, благодаря бурному развитию технологий дистанционного зондирования Земли, подавляющая часть геопространственных данных, характеризующих природные ресурсы, объекты АПК, инфраструктуру, создается в цифровом виде. В результате интеграции различных источников пространственных данных (геоданных) формируются большие массивы данных (BigData), существенно расширяются и преумножаются возможности пространственного и временного анализа исследуемых процессов и явлений, а также использования их результатов для решения теоретических и прикладных задач АПК.

Интернет, развитие технологий беспроводной связи предоставили удобный механизм для создания, накопления, обмена и применения геоданных для решения разнообразных задач, в различных областях

деятельности, а также, что зачастую не менее важно, в области междисциплинарного взаимодействия. Благодаря веб и мобильным приложениям геоинформационные системы приобрели широкий круг пользователей и сегодня почти все пользователи интернета так или иначе имеют дело с ресурсами, использующими пространственную привязку информации. Картографические сервисы (Яндекс Карты, Google maps, 2GIS и др.) реализуют доступ пользователей к адресам и информации по огромной базе данных организаций (контактная информация, часы работы, служебная информация, фотографии и отзывы), просмотр местоположений на любом настольном компьютере, ноутбуке или мобильном устройстве, построение маршрутов для пешеходов и водителей с возможностью пошаговой навигации по маршруту, функционал навигатора по выбранной траектории движения. API этих сервисов, на основе мешапного подхода, широко используются в большом количестве сторонних сервисов и приложений для картографического отображения информации и организации доступа пользователя к многочисленным ресурсам.

В качестве примеров ресурсов, которые разработаны специально для целей инвентаризации и мониторинга сельского хозяйства и природных ресурсов, можно привести портал Министерства сельского хозяйства РФ «Единая федеральная информационная система о землях сельскохозяйственного назначения», «Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России» Центра регистра и кадастра, «Публичная кадастровая карта» Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии и многие др.

Не только государственные, но и коммерческие организации разрабатывают сервисы для АПК, использующие технологии геоинформационных систем, дистанционного зондирования Земли, глобальных навигационных систем и искусственного интеллекта (ГИС-ДЗЗ-ГНСС-ИИ). Среди компаний, работающих в данном направлении, можно отметить комплексные цифровые платформы для растениеводства - Eхact

Farming, Агросигнал, История поля, Агроаналитика, которые позволяют специалистам агропромышленного комплекса решать их производственные задачи. Агрономам эти решения позволяют отслеживать состояние полей в режиме реального времени, планировать с/х операции, диспетчерам автоматически формировать путевые листы, контролировать топливную цепочку, экономистам рассчитывать заработную плату, вести сезонное и оперативное финансовое планирование, руководителю отслеживать показатели КРІ и повышать прибыль агропредприятия.

### **Геоинформационные системы**

Геоинформационная система (географическая информационная система, ГИС) — система сбора, хранения, анализа и графической визуализации геоданных (пространственных, географических) и связанной с ними информации об объектах. ГИС-системы включают в свой состав данные дистанционного зондирования Земли, пространственные базы данных (в том числе под управлением универсальных СУБД), редакторы растровой и векторной графики, различные средства пространственного анализа данных. Обычно ГИС системы имеют блок визуализации информации на карте.

Геоинформационные системы оказали большое влияние на многие аспекты человеческой деятельности, меняя не только их формы, но зачастую и их содержание. При этом ГИС охватывает разнообразные пространственные уровни - глобальный, региональный, национальный, локальный, муниципальный, полевой и т.д. - интегрируя в тематические слои данных самую разнообразную цифровую информацию (рис. 1.1) в виде слоев векторных и растровых тематических данных.

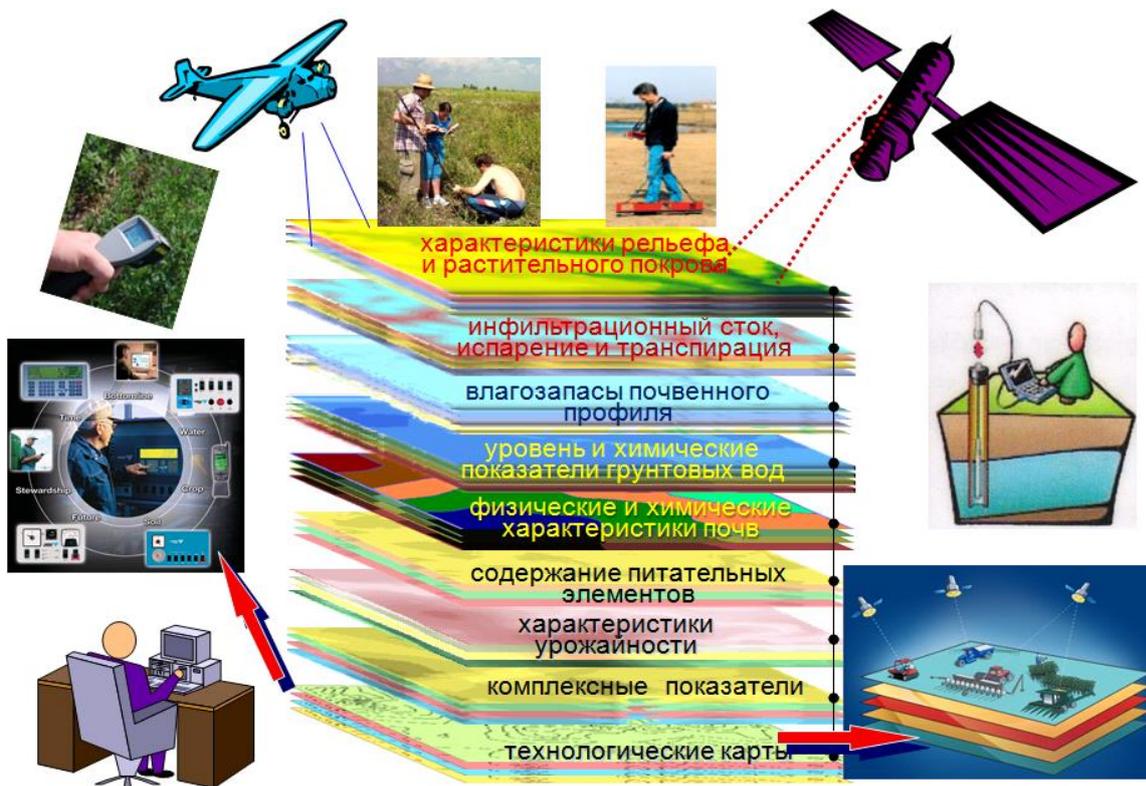


Рисунок 1.1 – Схематическое представление геоинформационных слоев данных

Тематическое многообразие геоинформационных ресурсов разного пространственного охвата, масштаба, точности и разрешения, а кроме того, еще и разных форм графического представления, делают актуальной задачу обмена и совместного использования пространственных геоданных посредством телекоммуникационных сетей, являющейся одним из этапов формирования геоинформационного пространства и его инфраструктуры. В связи с этим большое значение приобретает создание специализированных геоинформационных порталов и веб-сервисов, позволяющих находить и использовать, распределенные по базам и хранилищам геоданных, геоинформационные ресурсы, что в большой мере соответствует понятиям комплексности и системности, заложенным в ГИС-технологиях.

Решение многих прикладных задач в области сельского хозяйства, оценки и рационального использования природных ресурсов в целях устойчивого развития отдельных территорий, мониторинга их экологического состояния требует достаточно полных сведений об этих пространственных объектах. В связи с этим перед соответствующими

специалистами возникают задачи выявления временных и пространственных связей между факторами и возможного их изменения под влиянием природных и антропогенных условий. Интенсивное развитие компьютерной техники и информационных технологий в последние годы позволило перейти на новые методы получения характеристик природно-экономических систем с помощью технологий географических информационных систем (ГИС), что сделало этот процесс более точным и полным, а также более быстрым по сравнению с традиционными методами.

## **Пространственно-временной анализ наборов геоданных в ГИС**

Одной из важных особенностей функционала ГИС, отличающей ее от систем автоматизированного картографирования, является наличие возможности проведения пространственного анализа наборов геоданных (геодатасетов). Пространственный анализ позволяет решать сложные задачи, связанные с местоположением, исследовать и понимать данные с пространственной точки зрения, определять взаимосвязи между объектами, обнаруживать и количественно определять закономерности, оценивать тенденции, а также делать прогнозы и принимать на основе них обоснованные решения. Пространственный анализ является направлением, сочетающим в себе моделирование в ГИС, математическую статистику и эконометрику.

Функциональные возможности ПО ГИС определяют тот круг операций, который может создать новые данные из существующего набора данных. Такие функции реализуются применением одного или более инструментов (алгоритмов) к исходному набору данных и на выходе дают новую информацию, новые знания. Поэтому необходимо знать какие стандартные возможности пространственного анализа заложены в ПО ГИС для того, чтобы правильно применить имеющийся инструментарий к данным.

### **Векторная и растровая модели в ГИС**

Информационную основу ГИС образуют цифровые представления (модели) реальности или цифровые двойники объектов. Модель – такое описание объекта исследования, которое сохраняет основные свойства объекта, но не содержит второстепенных.

Основой описания процессов и пространственных объектов на земной поверхности является их пространственная информация, помещаемая в базы геоданных, связанная с соответствующей системой земных координат.

Базы цифровых геоданных (БГД) представляют собой наборы пространственно референцированных (привязанных) слоев геоданных.

Обычно основным слоем БГД является географически привязанная топографическая основа. С этой основой связываются другие слои геоданных, с информацией о пространственных объектах, находящихся на том же пространственном экстенде. В процессе создания и связывания слоев между ними устанавливаются необходимые связи, что в итоге позволяет выполнять вычислительные операции с пространственными объектами, необходимые для картографического моделирования и пространственно-временного анализа.

Географические данные (геоданные) имеют три главных составляющих: географическое положение, атрибуты и время. Другими словами - где находится объект, что он собой представляет и когда он существовал. Абсолютное географическое положение объекта может быть определено в прямоугольной системе (x, y, z) или глобальной системе координат (широта, долгота, высота), а также в какой-то абстрактной системе (например, адрес дома).

Координаты местоположения и времени являются необходимыми наборами данных, позволяющими с одной стороны находить и описывать требуемую информацию, а с другой стороны интегрировать ее для решения прикладных задач.

База данных любой ГИС состоит из цифровых представлений пространственных данных (векторных, растровых, квадротомических и иных), которые принято называть моделями пространственных данных. Модели пространственной информации соединяют свойства реальных пространственных объектов и данные о них. Модели отражают логические правила формализованного цифрового описания объектов реальности как пространственных объектов. Рассмотрим две базовые и широко используемые модели ГИС: векторную и растровую модели.

## Векторная модель географических данных

Для хранения цифровых пространственных данных, позиционной и атрибутивной их составляющих, в геоинформационных системах применяют различные структуры, которые связаны в основном с векторным или растровым представлениями географических объектов. Способы компьютерной реализации этих представлений носят, соответственно, названия векторной и растровой модели.

Векторная модель данных представляет собой способ представления геопространственных объектов с помощью элементарных графических примитивов:

- 1) точек (0-мерные объекты, имеющие определенное положение в пространстве, но не имеющие размеров);
- 2) линий (1-мерные объекты, состоящие из двух и более 0-мерных объектов, с вычисляемой длиной);
- 3) полигонов (2-мерные объекты, ограниченные по крайней мере тремя одномерными объектами, с вычисляемыми площадными характеристиками);
- 4) объемных фигур (3-мерные объекты, ограниченные, по крайней мере четырьмя двумерными объектами, с вычисляемыми объемными характеристиками).

В базе данных ГИС с помощью векторной модели данных реализуется представление геопространственных данных заданием пар прямоугольных координат точек (X,Y), определяющих начало и направление вектора (элементарную дугу). Последовательность дуг образует линейный пространственный объект базы данных ГИС. Каждый линейный объект определяется упорядоченным набором пар координат точек. В свою очередь, набор замкнутых линейных объектов образует полигон – площадной пространственный объект базы данных ГИС (рис.1.2). Векторная модель

хорошо подходит для описания дискретных объектов, с фиксированными границами.

Примерами точечных объектов могут служить отдельно стоящие объекты, представляющие собой единое целое, такие как фонарный столб, колодец, точка отбора проб, строение и др. Точечные объекты дискретны, то есть у них есть определенное положение в пространстве. При моделировании принимают, что у таких объектов нет пространственной протяженности (длины и ширины), хотя в действительности эти объекты имеют пространственную протяженность, но масштаб модели, в которой рассматриваются эти геопространственные объекты, дает возможность представления их в виде точек. Например, если при анализе используются карты мелкого масштаба, то для пространственной визуализации достаточно представить отдельные крупные города точками, однако, при необходимости детализации их территорий, возникает необходимость отображать их уже 2-мерными объектами (площадными, полигональными), позволяющими визуализировать и учитывать в анализе их внутреннюю картографическую структуру.

Линии представляют географические объекты, длина которых на заданном масштабе существенно больше ширины, или объекты, у которых ширина отсутствует изначально (например, границы районов). Примерами таких объектов могут служить границы земельных объектов, водные объекты (реки), объекты инфраструктуры (дороги, линии электропередач) и пр.

Полигонами отображаются территории, занятые земельными участками, отдельными зданиями и сооружениями, то есть объекты, геометрию которых можно представить такими характеристиками как форма, ориентация, площадь, периметр и др.

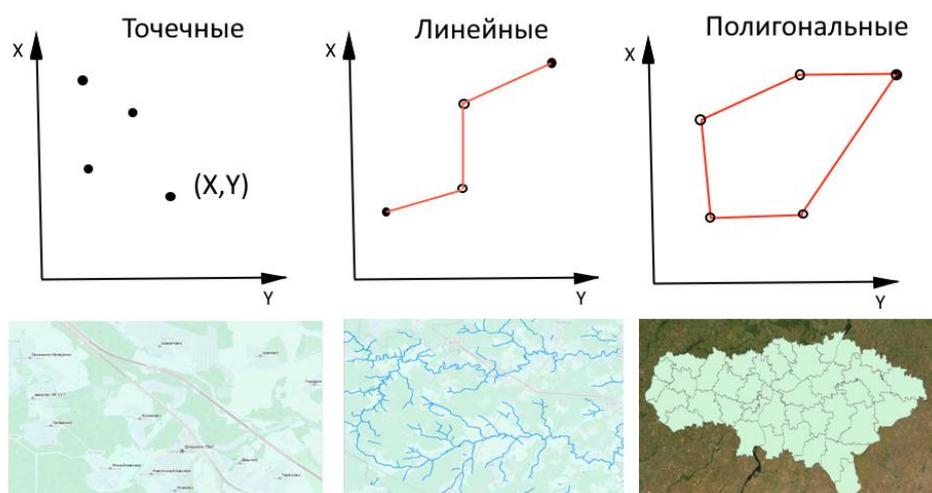


Рисунок 1.2 – Прimitives векторной модели данных

К преимуществам представления векторными моделями данных геопространственных объектов в ГИС можно отнести компактность структуры создаваемых для этого соответствующих слоев векторных данных, высокую достоверность отображения дискретных объектов, меньший объем требуемых для хранения данных (по сравнению с растровыми моделями), высокое качество визуализации пространственных данных, возможность топологического представления, широкие возможности по их вовлечению в геопространственный анализ и картографическое моделирование.

### **Растровая модель географических данных**

Растровая модель географических данных представляет собой способ представления географических данных в базе данных ГИС в виде равномерной ячеистой структуры, формирующей прямоугольную матрицу, в которой каждый элемент принимает определенное значение, присущее реальному пространственному объекту.

Растровые модели удобны для хранения и анализа данных, имеющих непрерывное распределение на некоторой территории в соответствии с моделью географических полей. Каждой ячейке (примитив, формирующий растровые данные) присваивается код, который представляет собой или цвет изображения или класс данных.

Растровые изображения - это регулярная сетка (растр, матрица, грид), каждый из элементов которой можно описать двумя координатами (x,y или колонка, ряд) и дополнительным значением для каждой ячейки (Z) (рис.1.2).

Для растровых моделей существует ряд характеристик: разрешение, значение, ориентация, положение.

Разрешение – минимальный линейный размер наименьшего участка пространства (поверхности), отображаемый одним пикселем. Чем выше разрешение, тем качественнее и информативнее изображение. Более высоким разрешением обладает растр с меньшим размером ячеек.

Размер ячейки определяет, насколько качественно или, наоборот, грубо будут отображены объекты на растровом изображении. Чем меньше размер ячейки (разрешение), тем более сглаженным и детализированным будет растр. Однако с увеличением числа ячеек будет увеличиваться и длительность процесса, а также занимаемый растром объем дискового пространства. Если же размер ячейки будет слишком большим, то может потеряться часть информации и мелкие объекты могут пропасть с изображения. Например, если размер ячейки будет больше, чем ширина дороги, дорога на таком растре может не читаться.

Значение – элемент информации, хранящейся в элементе растра. Каждый элемент растра или каждая ячейка должны иметь лишь одно значение. Часто это не совсем корректно, т.к. граница двух типов почв, например, может проходить через центр элемента растра. В таких случаях элементу дается значение, характеризующее большую часть ячейки или ее центральную точку. Ряд систем позволяет иметь несколько значений для одного элемента растра, с указанием их пространственной доли в ячейке. Существуют различные типы значений растровой модели: целые числа, действительные (десятичные) значения, буквенные значения.

Положение обычно задается упорядоченной парой координат (номер строки и номер столбца), которые однозначно определяют положение каждого элемента отображаемого пространства в растре. Для определения

местоположения в системе координат обычно задается координата для левого нижнего/верхнего угла матрицы (растра) и линейный размер одной ячейки. Затем выполняется вычисление координаты любого пикселя по его положению на растре.

Растровые изображения создаются в результате цифрового фотографирования (аэрофото- и космоснимки), сканирования (бумажные планово-картографические материалы) или операций растровой алгебры (пример, расчет вегетационного индекса NDVI).

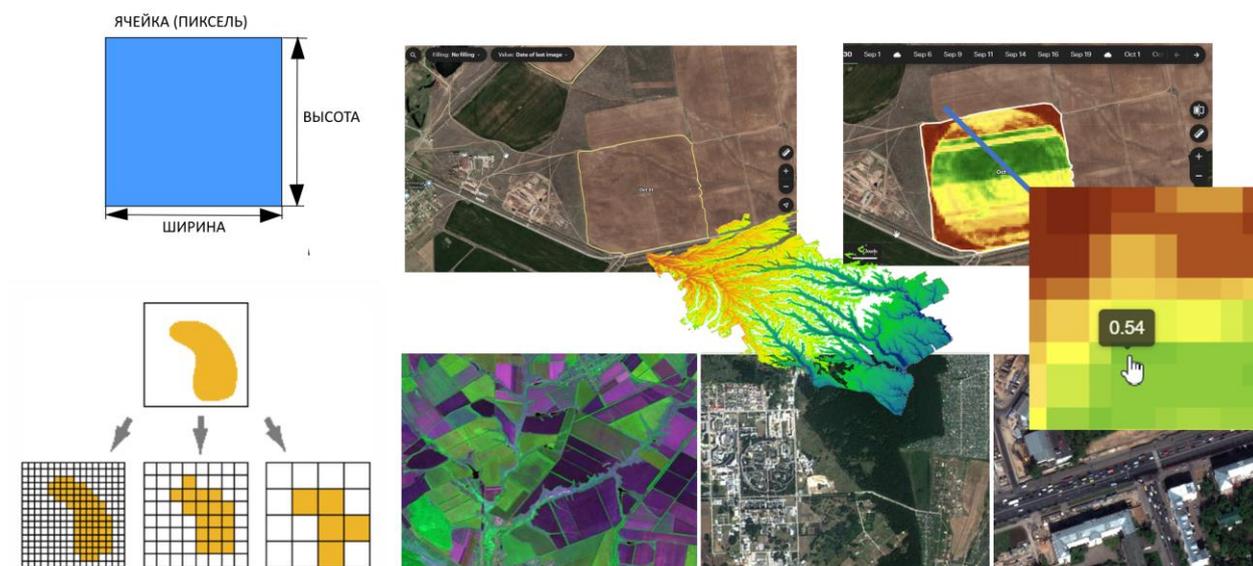


Рисунок 1.3 – Растровая модель данных

### Векторный анализ данных в ГИС

Векторный анализ в ГИС используется при обработке цифровых векторных слоев с учетом атрибутов объектов. Наиболее он оправдан при работе с дискретными географическими объектами, т. е. имеющими четкие границы в геопространстве.

Использование ГИС обеспечивает традиционный анализ таблиц: запросы, сортировки, выборки, калькуляция, вычисление статистики, но пользователь также получает инструмент, позволяющий еще и непосредственно отображать запрос на динамической карте, что значительно упрощает работу с данными (датамайнинг).

Легкое автоматическое построение тематических карт по атрибутивной информации позволяет заметить пространственные закономерности в распределении объектов. На рисунке 1.4 отображена двухслойная картограмма, представляющая данные из государственного (национального) доклада «Состояние и использовании земель в Российской Федерации в 2020 году», приведенные в таблице «Состояние мелиорированных земель по субъектам Российской Федерации (на 1 января 2021 года, тыс. га)».

На первом слое, отображенном с помощью границ субъектов РФ, соответствующие им территории представлены заливкой зеленого цвета, начиная от светло зеленого тона с последовательным увеличением доли темных тонов по мере увеличения площади мелиорируемых земель в составе земельного фонда субъекта.

Второй слой с помощью круговых диаграмм, помещенных в центр территорий соответствующих субъектов РФ, отображает доли орошаемых и осушаемых земель от общей площади мелиорируемых земель, которые дополнительно включают земли, для мелиорации которых используют химические, биологические и другие технологии.

Так, согласно этой картограмме, большинство орошаемых земель находится в субъектах, расположенных на юге РФ, тогда как осушаемые земли находятся, в основном, в субъектах, расположенных в центре и на севере. В целом такое распределение площадей осушаемых и орошаемых земель по территории РФ соответствует аналогичному распределению норм годовых осадков по территории РФ, с наибольшими значениями на севере и наименьшими на юге.



Рисунок 1.4 – Картограмма площадей мелиорируемых земель субъектов РФ, на 1 января 2021 года, тыс. га

Основные виды векторного анализа в ГИС:

- элементарный пространственный анализ;
- пространственно-временная статистика;
- расширенный пространственно-временной анализ;
- сетевой анализ.

В ГИС широко используется автоматизированный расчет геометрических характеристик объектов: координат точечных объектов, длин, площадей, периметров. Например, расчет площади и периметров полей хозяйства, вычисление длины пройденного маршрута техникой и т. д.

Построение буферных зон – операция, позволяющая определить области, окружающие объект и представляющие собой полигоны. Ширина буферной зоны определяется расстоянием, которое может задаваться одним числом для всех объектов слоя или различными быть представлены для каждого объекта (или группы объектов) отдельно. Также можно создавать множество концентрических буферных зон заданной ширины. Обычно

построение буферных зон используется в задачах при проектировании охранных зон, близости расположения объекта, дальности действия и т. д.

Оверлейные операции — это операции наложения друг на друга двух или более слоев, результатом которой является графическая композиция (графический оверлей) или один слой, содержащий композицию пространственных объектов исходных слоев, топологию этой композиции и атрибуты, арифметически или логически производные от значений атрибутов исходных объектов (топологический оверлей в векторном представлении пространственных объектов). Данный вид операций базируется на координатной совмещенности данных, то есть слои, для которых выполняется анализ, должны быть представлены в одной системе пространственных координат, проекции и масштабе.

К оверлейным обычно относят операции: определения принадлежности точки полигону; определения принадлежности линии полигону; определения принадлежности полигона полигону; наложения двух полигональных слоев; уничтожения границ одноименных классов полигонального слоя с порождением нового слоя; определения линий пересечения объектов; объединения (комбинирования) объектов одного типа; определения точки касания линейного объекта и т. д.

Переклассификация — это аналитическая операция, направленная на преобразование слоя на основе ранжирования какого-либо признака или переопределения классов (смена идентификаторов), объединения областей в соответствии с заданными критериями.

Пространственная статистика содержит статистические инструменты, используемые для анализа пространственного распределения, структур, процессов и отношений. Хотя между пространственной и непространственной (традиционной) статистикой имеется определенное сходство (с точки зрения концепций и целей), пространственная статистика уникальна тем, что разрабатывалась специально для работы с географическими данными. В отличие от традиционных,

непространственных статистических методов, пространственная статистика непосредственно в своих вычислениях использует данные о пространстве (близость, площадь, связность и/или другие пространственные отношения).

Задачи сетевого анализа - поиск ближайшего пункта, разработка кратчайшего маршрута, определение зон обслуживания, определение местоположения по адресу (геокодирование). В данном виде анализа важнейшей информацией служит не сам объект, а его взаимосвязи.

### **Растровый анализ данных в ГИС**

Растровый анализ в ГИС используется при обработке цифровых растровых грид-слоев с учетом их атрибутов. Растровый анализ наиболее применим для непрерывных географических явлений или процессов. Основные виды растрового анализа в ГИС включают интерполяцию растра, анализ поверхностей, картирование плотности, картирование расстояний, использование функции картографической растровой алгебры.

Интерполяция рассчитывает значения ячеек грида на основании ограниченного числа точек измерений. Ее можно использовать для вычисления неизвестных значений любых географических точечных данных: высоты над уровнем моря, уровня осадков, концентрации химических веществ, уровня шума и т. д.

Среди методов анализа поверхностей в ГИС можно выделить построение изолиний и расчет морфометрических характеристик рельефа. По созданной средствами интерполяции грид-поверхности (например, абсолютных высот, температур воздуха, осадков, загрязнения атмосферы и т.д.) в ГИС можно сформировать векторный слой изолиний. Они создаются в автоматическом режиме. Пользователю лишь остается выбрать интервал, через который они будут строиться, а также, при необходимости, минимальное и максимальное значения изолиний. Грид-модель земной поверхности, созданная в ГИС, может служить основой построения в автоматическом режиме морфометрических характеристик рельефа, таких

как экспозиция и крутизна склонов. По ней также возможно рассчитывать зоны видимости, строить гипсометрические профили и др.

Картирование расстояний средствами растрового ГИС-анализа позволяет определить пространственную взаимосвязь каждой ячейки по отношению к источнику или набору источников. В качестве примера можно привести расчет расстояний по отношению к слою метеостанций. По данной грид-модели можно проводить оптимизацию сети метеорологических наблюдений территории. С помощью грид-моделей плотности в ГИС анализируется пространственное распределение точечных либо линейных векторных объектов. Примером такого растрового ГИС-анализа может служить расчет общего показателя расчленения территории. Основными задачами картографической растровой алгебры являются переклассификация грид-модели, а также выполнение различных математических и статистических операций с гридами. Переклассификация раstra означает замену входных значений ячеек новыми выходными значениями на основании новой информации при группировке значений или же при переклассификации значений по общей шкале. С несколькими растрами можно производить математические вычисления с помощью различных операторов и функций, создавать запросы выбора ячеек, а также выполнять статистику по ячейкам, по окрестности и зональную статистику.



Рисунок 1.5 – Пример слоя - результата растрового анализа, представляющий слой вегетационного индекса NDVI для поля 17 в сервисе ExactFarming

## **РАЗДЕЛ 2. Упражнение. Пространственная привязка исторического аэрофотоснимка Тимирязевской академии в QGIS**

**Цель упражнения:** провести пространственную привязку архивного аэрофотоснимка территории Тимирязевской академии в свободно-распространяемом ГИС ПО QGIS.

### **Задачи упражнения:**

1. Использовать базовые карты из сети Интернет для привязки;
2. Привязать изображение путём интерактивного определения положения точек привязки;
3. Провести трансформирование изображения с помощью трех моделей трансформирования;
4. Оценить точность привязки карты.

**Исходные данные:** растровое изображение исторического аэрофотоснимка Тимирязевской академии в формате JPG (1953\_Photo\_aero.jpg).

**Результат:** Привязанные и трансформированные растровые изображения, пригодные для непосредственно использования в ГИС.

### **Введение**

Растровые данные получают из различных источников. Таковыми могут являться спутниковые снимки и аэрофотоснимки, а также отсканированные карты. Современные спутниковые снимки, а также аэрофотоснимки, как правило, содержат достаточно точную информацию о местоположении отображаемых на них пространственных объектов. Однако, в ряде случаев могут нуждаться в корректировке для более точного соответствия другим слоям геоданных.

Обычно, отсканированные карты, а также архивные аэрофотоснимки не содержат данные координатной привязки. Таким образом перед использованием в ГИС-проектах непривязанных изображений наряду с другими слоями геоданных, содержащих координатно-привязанные (геореференцированных) объекты, необходимо провести координатную привязку первых. Для координатной привязки (геореференцирования) применяются ряд методов, различающихся по сложности, а также потребности в дополнительных данных.

### **Метод**

В основном пространственная привязка растровых данных происходит с использованием уже имеющихся целевых данных, таких как растры с имеющейся пространственной привязкой или класс векторных объектов, которые находятся в нужной системе координат.

Процесс пространственной привязки начинается с определения серии опорных точек - известных пар координат  $(x,y)$ , которые связывают местоположения в наборе растровых данных с соответствующими местоположениями целевых данных (имеющих пространственную привязку). Опорными точками являются такие местоположения, которые можно легко определить в двух наборах данных. Множество объектов самых различных типов могут использоваться в качестве идентификаторов местоположений, например, пересечения дорог или водных потоков, устья рек, обнажения горных пород, углы улиц или площадей, пересечения лесозащитных полос.

Опорные точки используются для построения полиномиальной трансформации, с помощью которой набор растровых данных будет сдвинут в географически верное местоположение. Соединение между опорной точкой набора растровых данных (точка от) и соответствующей точкой уже выровненных данных (точка к) называется связью.

Необходимое количество связей зависит от сложности преобразования, которое вы планируете использовать для привязки набора растровых данных. При этом добавление дополнительных связей не обязательно повышает точность преобразования. Если возможно, то лучше равномерно распределить связи по всему набору растровых данных, а не концентрировать их в одном месте. Обычно, наличие одной связи в каждом из углов растра и нескольких посередине, обеспечивает наилучший результат. Чем больше область перекрытия между набором растровых данных и целевыми данными, тем лучше результат привязки. Например, если ваши целевые данные занимают четверть области набора привязываемых растровых данных, то опорные точки будут сконцентрированы только в этом районе. Таким образом, все, что не попадает в область перекрытия, скорее всего, будет привязано некорректно.

Необходимо иметь в виду, что точность данных, для которых вы выполняете пространственную привязку, не будет выше точности тех данных, по которым вы это делаете. Для того, чтобы уменьшить количество ошибок, осуществлять пространственную привязку следует по данным самого высокого разрешения и самого крупного масштаба (из имеющихся в наличии).

### **Задание**

В нижеприведенном упражнении предлагается провести пространственную привязку архивного аэрофотоснимка территории Тимирязевской академии, датированного 1953 годом, и провести оценку изменений, произошедших на территории с того времени.

В этом упражнении привязка будет осуществляться, посредством поиска и соотнесения одних и тех же объектов на двух изображениях, используя в качестве опорного материала базовую карту (спутниковые данные), представленный в целевой системе координат (в данном случае это WGS 84/World Mercator).

Последовательность шагов выполнения задания включает следующие последовательные этапы:

- ✓ пространственная привязку архивного снимка;
- ✓ трансформирование снимка с использованием нескольких методов;
- ✓ сравнение качества использованных методов трансформации.

Последовательность шагов выполнения упражнения:

- 1) Откройте новый проект в QGIS (рис. 2.1) и добавьте в качестве базовой карты любое покрытие космических снимков, например Yandex Satellite (Яндекс спутник).

*Комментарий. Для добавления базовой карты, в окне поиска QMS необходимо ввести название источника Yandex Satellite и, после чего нажать кнопку «Добавить», расположенную напротив его названия.*

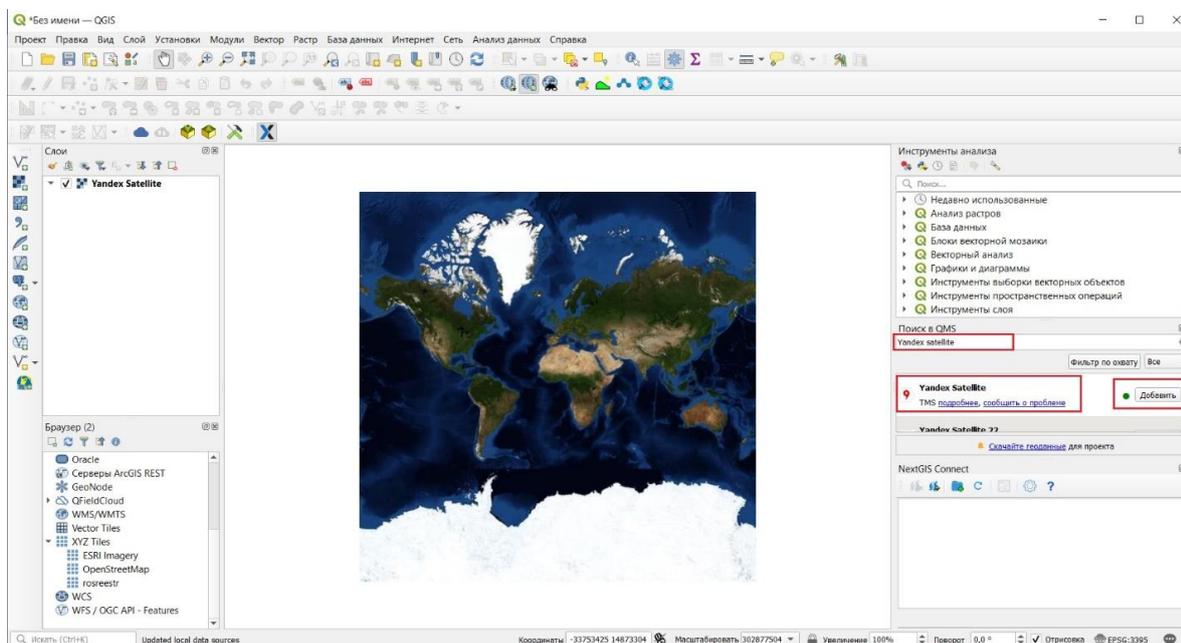


Рисунок 2.1– Открытие нового проекта в QGIS и добавление базовой карты

- 2) Проведите исследование исходных данных на архивном снимке, отображающем нынешнюю территорию САО г. Москвы.

*Комментарий. Для исследования архивном снимке его необходимо открыть с помощью любого доступного приложения отображения изображений (рис. 2.2).*

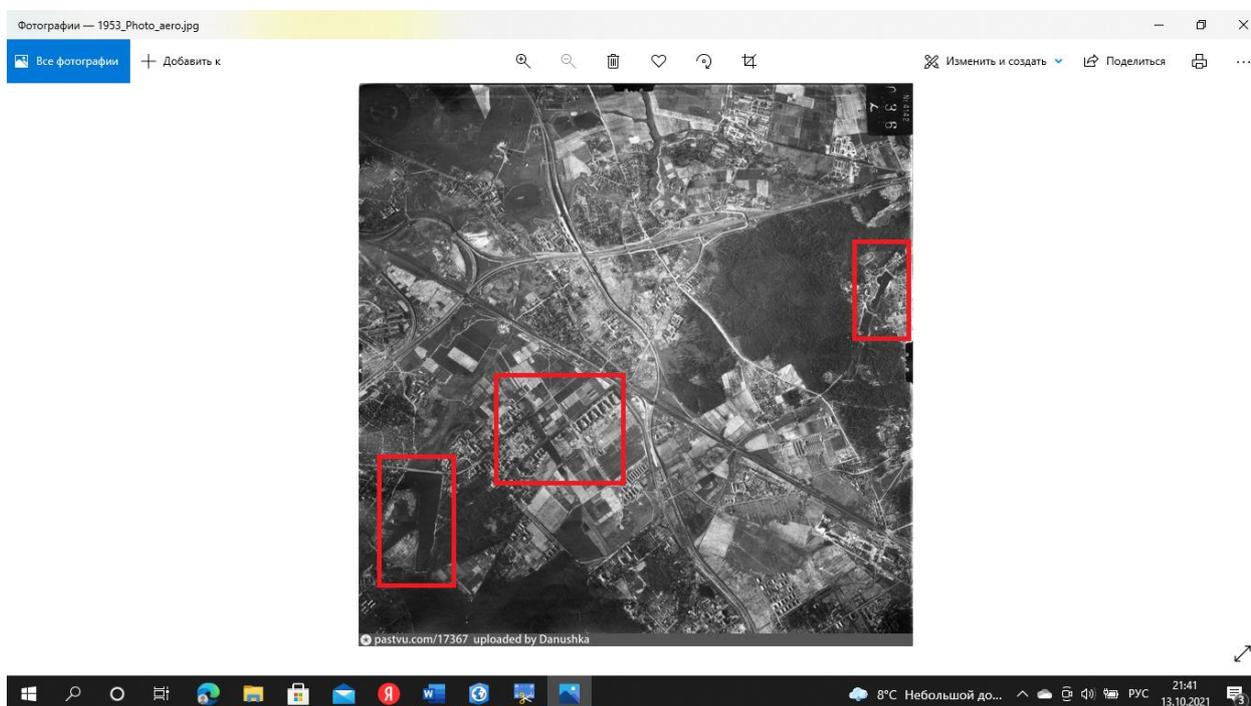


Рисунок 2.2 – Исследование архивного аэрофотоснимка

*Комментарий. На архивном аэрофотоснимке хорошо различим ряд существующих в настоящее время объектов: а) Большой садовый пруд, здания на территории кампуса Тимирязевской академии, а также территория ВДНХ.*

3) Найдите примерно такой же экстенд на базовой карте нашего проекта.

*Комментарий. Воспользуйтесь инструментом «Поиск» ПО QGIS, наберите почтовый адрес административного корпуса Тимирязевской академии (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49) в поисковой строке, выбрав Геокодер Nominatum (рис. 2.3).*

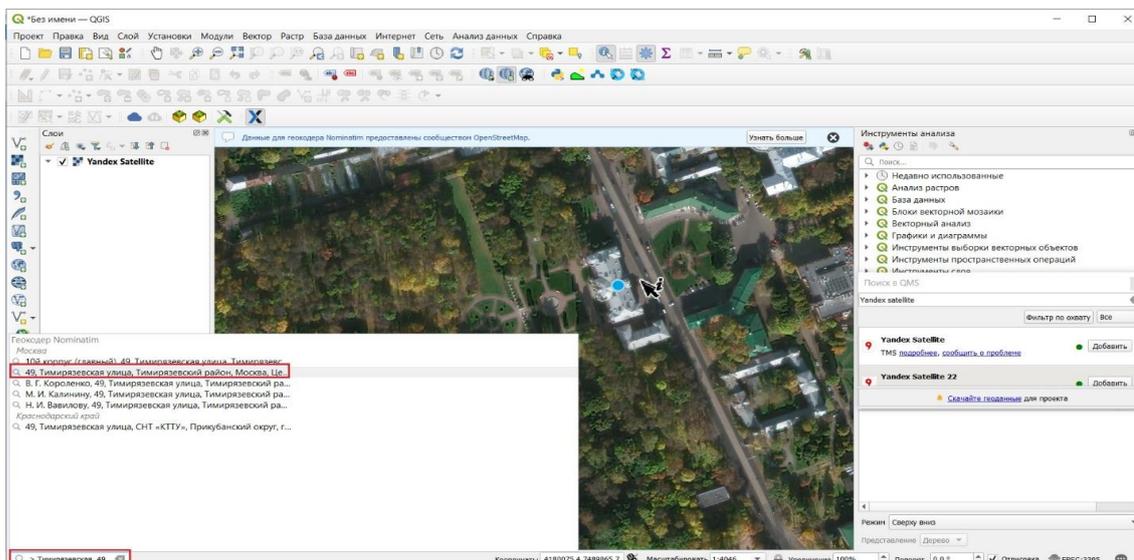


Рисунок 2.3 – Определение местоположения первого корпуса Тимирязевской академии

- 4) Отдалите карту так, чтобы в видимом экстенсте окна визуализации была отображена территория, которая запечатлена на историческом аэрофотоснимке.
- 5) Создайте закладку с определенным вами экстенстом для того, чтобы при необходимости вы могли быстро к нему вернуться (рис. 2.4).

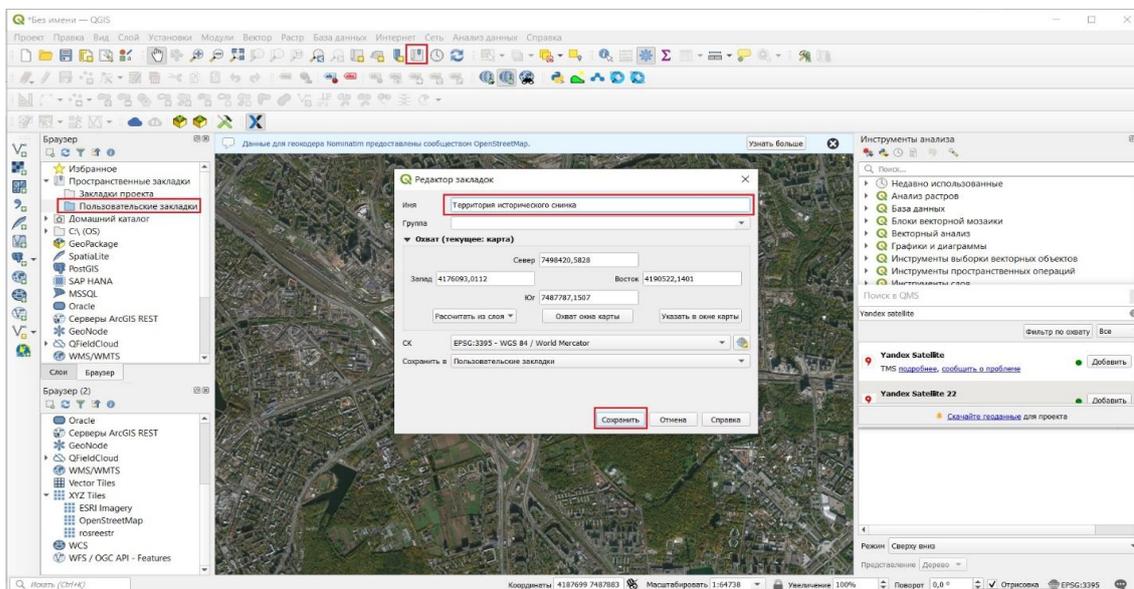


Рисунок 2.4 – Создание закладки экстенста привязки архивного аэрофотоснимка

- б) Сохраните проект, указав путь к выбранному месту его хранения, задав название проекта.
- 7) Добавьте исторический снимок поверх базового слоя.

*Комментарий.* После добавления архивного аэрофотоснимка поверх базового слоя он отобразится как слой на панели слоев. Однако, поскольку он не привязан, то он не отобразится поверх текущей карты САО (рис. 2.5). Это связано с тем, что архивный аэрофотоснимок отображается в геоточке с нулевыми координатами широты и долготы (0,0). Перед тем, как это исправить, просмотрите снимок на карте, для этого нажмите на слой в таблице содержания правой кнопкой мыши и в отобразившемся списке выберите «Увеличить до слоя» (рис. 2.5).

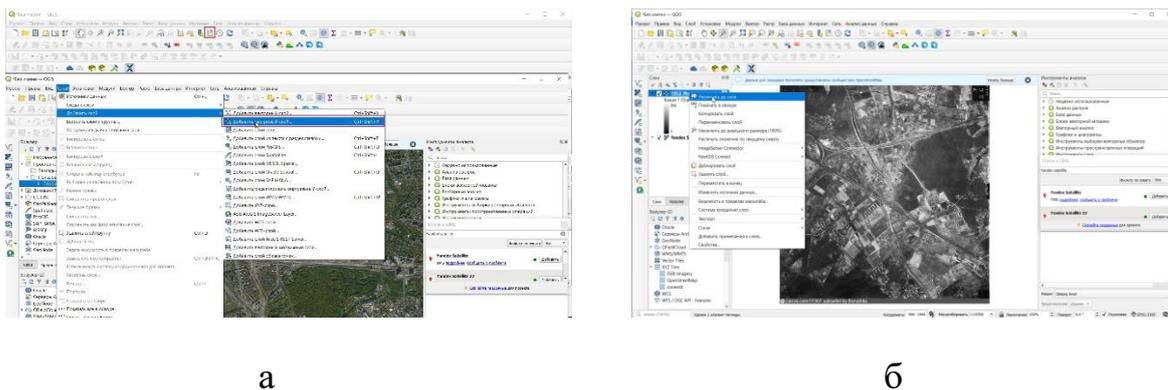


Рисунок 2.5 – Добавление архивного аэрофотоснимка в проект с отображением поверх базового слоя

*Комментарий.* При значительном отдалении экстенда базового слоя архивный аэрофотоснимок отобразится рядом с западным побережьем Африки. Это подтверждает, что непривязанный архивный аэрофотоснимок оказался в геоточке с координатами широты и долготы (0,0) т. е. в геоточке, принятой за начало координат (рис. 2.6).

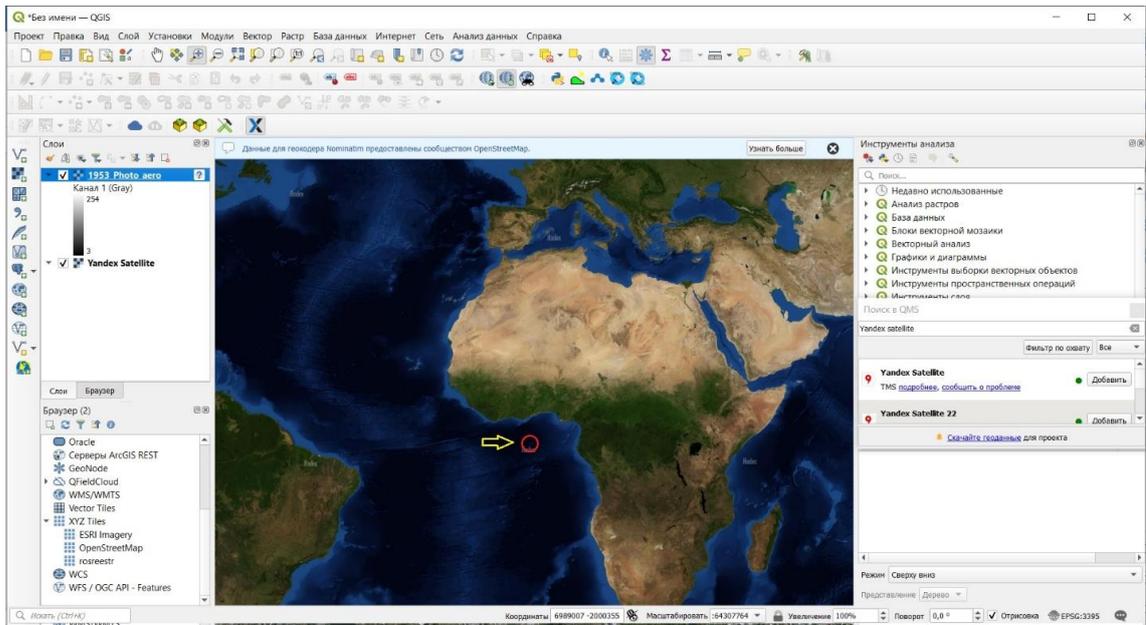


Рисунок 2.6 – Местоположение нашего добавленного архивного аэрофотоснимка

8) Вернитесь к экстенду CAO, зафиксированному ранее на соответствующей вкладке, и активируйте модуль привязки (рис. 2.7);

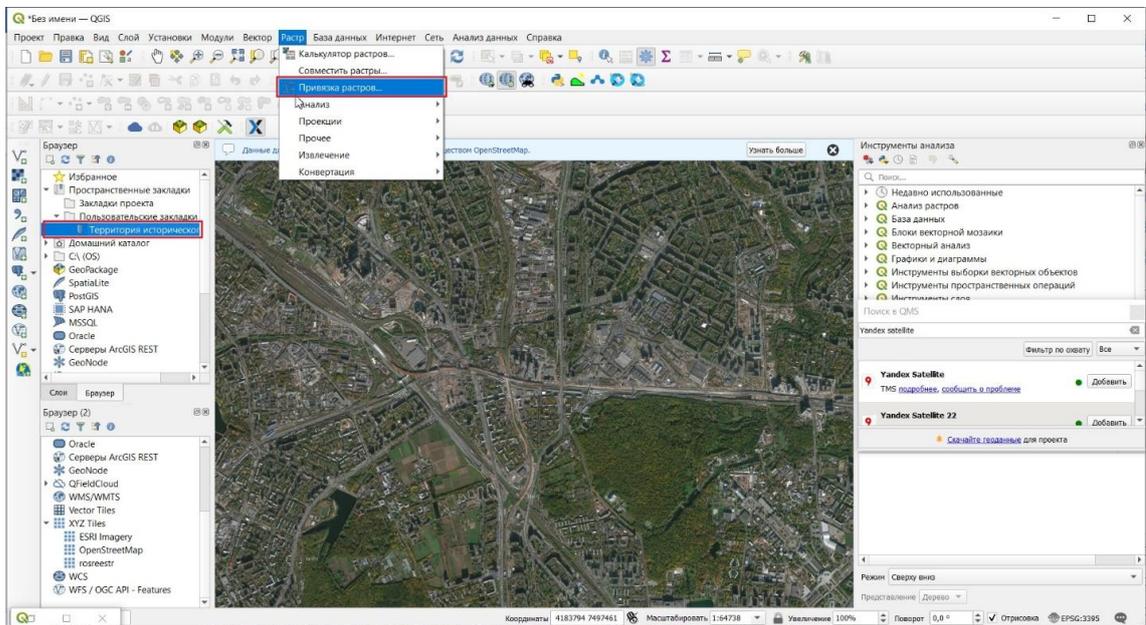


Рисунок 2.7 – Открытие сохраненной закладки и активация модуля привязки изображений

9) Добавьте в активированный модуль привязки изображение 1953\_Photo\_aero.jpg. Изображение на историческом аэрофото повернуто относительно изображения базовой карты. Чтобы облегчить опознавание опорных точек, поверните изображение в основном окне QGIS. Для этого найдите в нижней правой части окна QGIS настройку «Угол поворота» и введите значение 20 градусов (рис. 2.8)

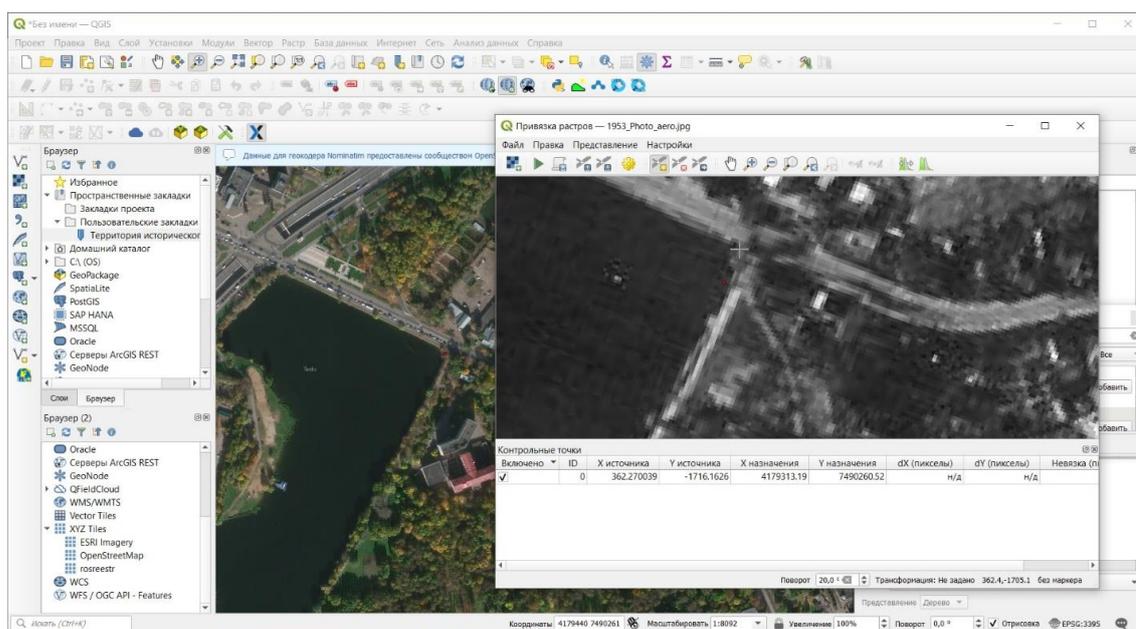


Рисунок 2.8 – Создание пары опорных геоточек для привязки изображения

10) Приблизьте экстенд базовой карты так, чтобы отображался Большой садовый пруд. Затем выберите геоточку для привязки, хорошо распознаваемую, как на архивном аэрофотоснимке, так и на базовой карте.

11) Установите первую опорную геоточку нажатием левой кнопки мыши в окне модуля привязки. Затем, когда появится окно ввода координат, нажмите кнопку «С карты».

*Комментарий.* Это позволит автоматически присвоить координаты опорной геоточки с базовой карты контрольной геоточке на архивном аэрофотоснимке. В результате окна

привязки и ввода координат свернутся, давая возможность найти соответствующую геоточку на карте основного окна QGIS с отображаемым в нем архивным аэрофотоснимком.

- 12) Найдя соответствующую геоточку опорной пары на базовой карте, кликните по ней левой кнопкой мыши.

*Комментарий.* Координаты опорной геоточки (в системе координат проекта) будут присвоены опорной геоточке архивного аэрофотоснимка. На рисунке 2.9 представлен вариант создания пары опорных точек с использованием элемента пространственного объекта, расположенного на территории нынешнего ВДНХ.

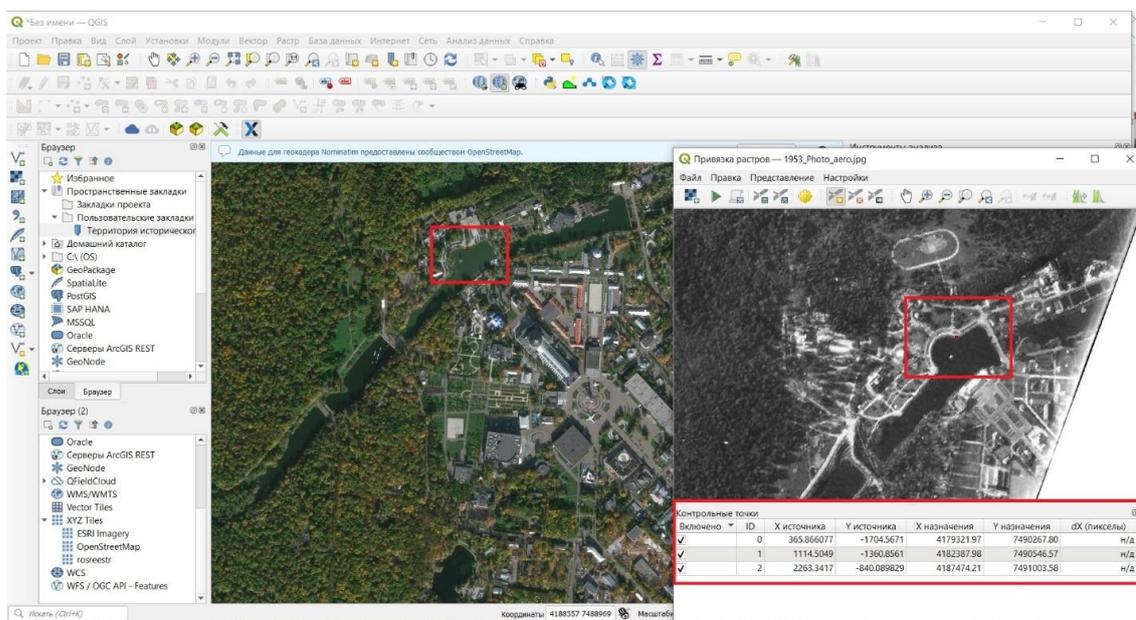


Рисунок 2.9 – Создание пары опорных геоточек на территории ВДНХ

- 13) Создайте 10–15 пар опорных точек, аналогично первой. Следите, чтобы геоточки были равномерно распределены по площади снимка и не были выстроены в одну линию.

*Комментарий.* Поскольку архивный аэрофотоснимок характеризуется высокой зашумленностью и «зернистостью», в этом упражнении не следует добиваться высокой точности привязки, что из-за этого не приведет к высокому качеству.

14) Проверьте ошибки положения опорных геоточек в таблице (столбец «Невязка (пиксели)»).

*Комментарий. Ошибка порядка 9–10 пикселей может считаться приемлемой. На рисунке 2.10 показано, что геоточка 10 имеет самую большую невязку, это указывает на необходимость коррекции ее привязки. Для этого следует либо отредактировать соответствующую пару опорных точек или удалить ее, заменив новой парой опорных точек. Заметьте, после редактирования общая (средняя) невязка тоже уменьшилась и составляет с 13,11 до 6,27 пикселей.*

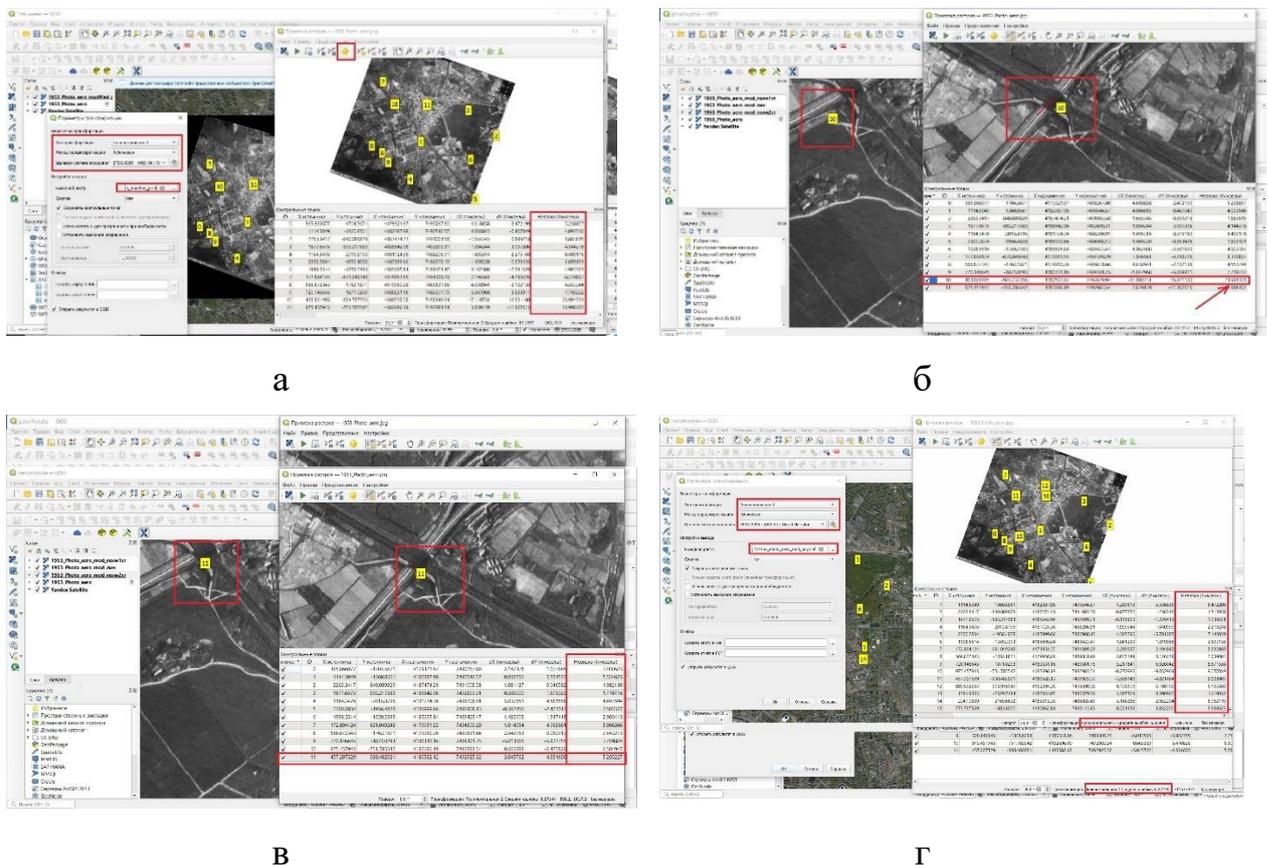


Рисунок 2.10 – Проверка ошибок положения опорных геоточек

15) Используйте полиномиальное преобразование 2-й степени (рис. N.10г) для настройки параметров геометрического трансформирования архивного аэрофотоснимка. Обычно, этот вариант используется для изображений со значительными искажениями геометрии.

16) Укажите путь к папке modified\_images в рабочей директории, куда должно быть сохранено трансформированное (привязанное) изображение архивного аэрофотоснимка с именем 1953\_Photo\_aero\_mod\_poly2.tif.

17) Запустите трансформацию. После того, как трансформированное изображение добавится в проект, сравните его с базовой картой (рис. 2.11).

*Комментарий. Если привязанное изображение архивного аэрофотоснимка удовлетворительно согласуется с базовой картой, то закончите манипуляции с привязкой, закрыв окно привязки. Если заметны смещения каких-либо элементов на экстенде привязанного архивного аэрофотоснимка в сравнении с изображением на базовой карте, вернитесь в окно привязки и отредактируйте опорные геоточки, а затем снова выполните трансформацию изображения.*

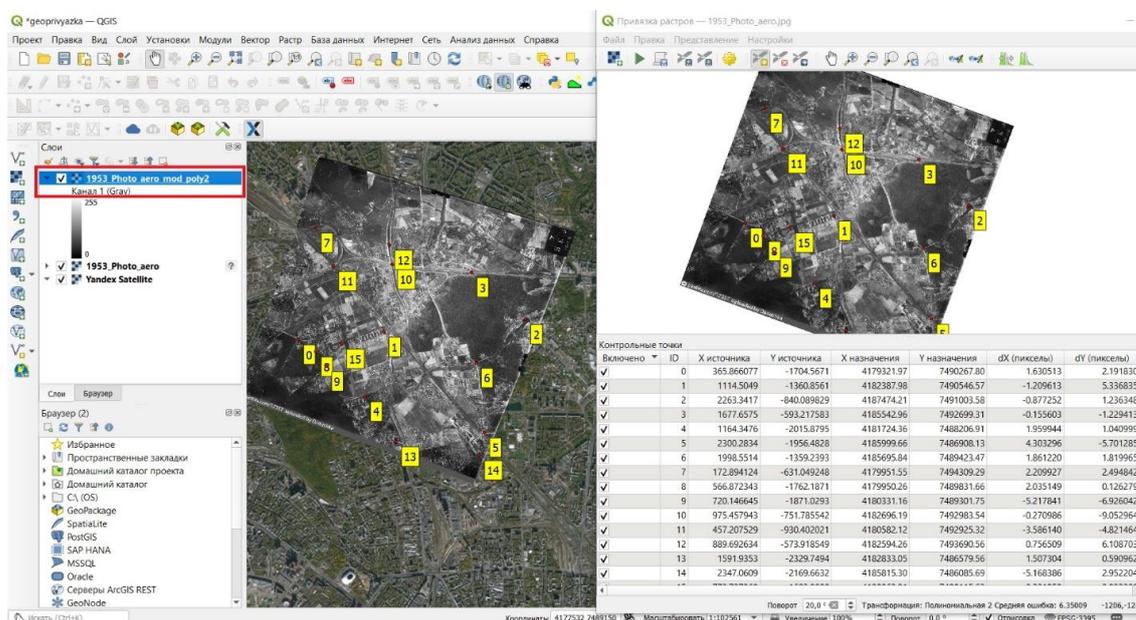


Рисунок 2.11 – Применение типа преобразования «Полином 2-го порядка» для трансформирования исходного изображения

- 18) Повторите процедуру привязки архивного аэрофотоснимка с помощью двух других моделей трансформирования - линейной и полиномиальной 1-го порядка (рис. 2.12).

*Комментарий.* Отметим, что невязка, полученная по линейной модели, составила 300 и более пикселей. Это свидетельствует о плохом качестве проведенного геопривязки и о том, что данная модель неприменима в данном случае.

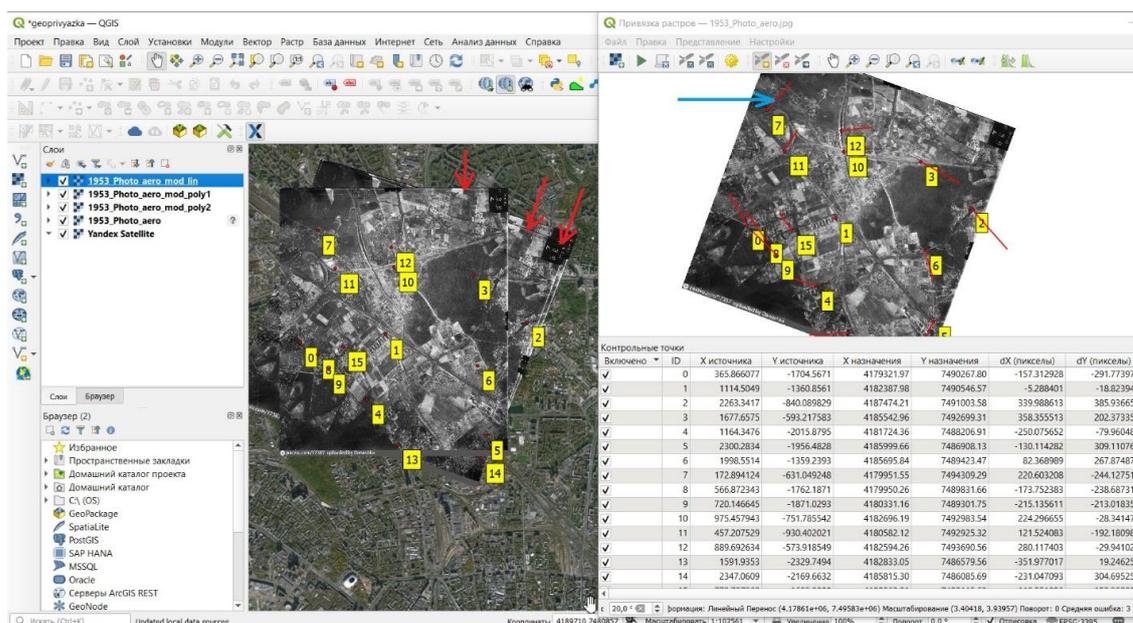


Рисунок 2.12 – Примеры привязки архивного аэрофотоснимка с помощью трех разных типов трансформирования

- 19) Проведите анализ результатов, помещенных в таблицу опорных точек.

*Комментарий.* Обратите внимание на значения невязок всех пар опорных геоточек, представляющих собой среднеквадратическую метрику (RMS) невязок по всем парам опорных точек, и позволяющую провести оценку качества выбранного метода трансформирования для возможности совместить опорные геоточки на исходном архивном аэрофотоснимке в места расположения опорных геоточек на базовом слое. Невязка представляется значениями смещений пар опорных геоточек,

*которая рассчитывается в пикселах. Невязки, близкие к нулю, рассматриваются как наиболее точные. В случае значительной невязки, для ее уменьшения можно удалить или добавить опорные геоточки. Однако, в ряде случаев значительная невязка может быть связана с неподходящим методом трансформирования, с помощью которого не удалось провести необходимое совмещение пар опорных геоточек.*

20) Проведите оценку точности привязки.

*Комментарий. При пользовании инструментами пространственной привязки важно понимать, что средняя невязка, посчитанная по определенному методу трансформирования, указывает на возможность текущей математической модели соответствовать существующим опорным геоточкам, но она не указывает на точность изображения. Если для проекта необходим отчет о точности, то используются метрики анализа по независимым парам геоточек, которые не были использованы для предшествующей привязки (не используемые в качестве опорных). Для реализации такого способа оценки часть пар опорных геоточек переводят в класс контрольных, или добавляют новые пары опорных геоточек. Поскольку геоточки не участвуют в вычислении параметров преобразования, то по ним можно проверять абсолютную точность привязки.*

21) Настройте параметры привязки: алгоритм привязки, алгоритм трансформации, систему координат и т. д.

22) Снимите галочки в таблице у трех-четырех опорных геоточек в середине снимка, на территории Тимирязевской академии (или добавьте дополнительные точки и также снимите флажки с этих строк) (рис. 2.13).

*Комментарий. Отключённые пары опорных точек перейдут в разряд контрольных, иными словами говоря, они не будут использоваться для вычисления параметров преобразования, однако рассчитываемые для них величины невязок будут рассчитаны.*

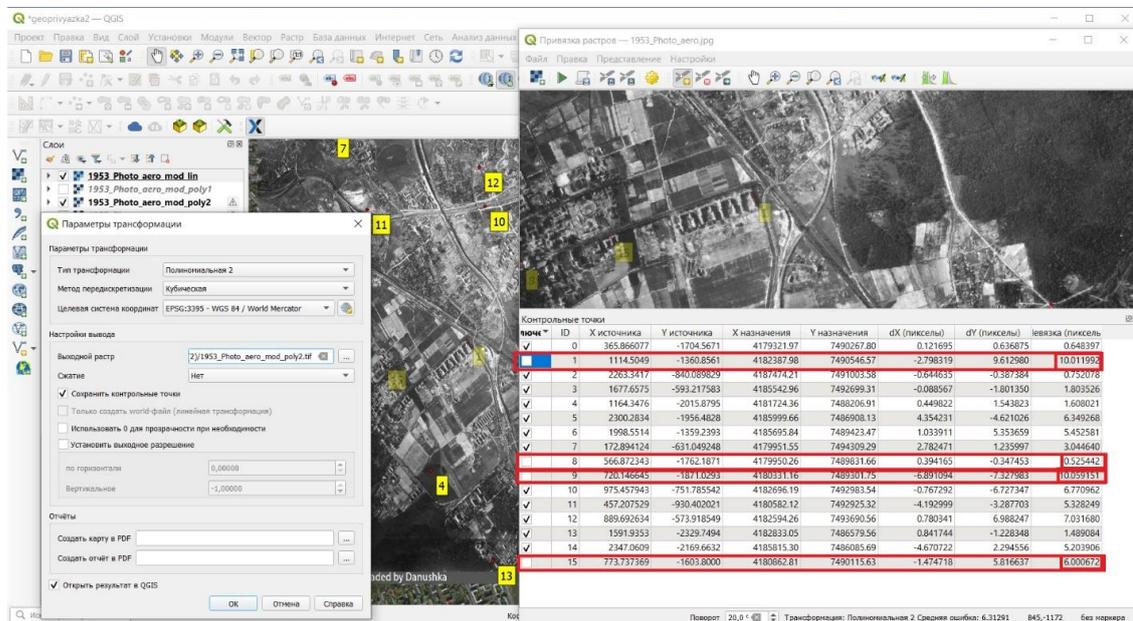


Рисунок 2.13 – Исключение пар опорных геоточек

- 23) Найдите максимальную невязку привязки по контрольным геоточкам. Запишите её значения с двумя знаками после запятой в отчетную таблицу (не забыв отметить название типа трансформации), помня, что она измеряется в пикселях. Рассчитайте абсолютное значение невязки, умножив рассчитанную величину на размер пиксела привязанного архивного аэрофотоснимка.
- 24) Для того, чтобы узнать размер пиксела откройте свойства добавленного растра (рис. 2.14) и найдите (на вкладке «Информация»), размер ячейки растра в целевой системе координат.
- 25) Рассчитайте максимальное значение абсолютной ошибки привязки (в метрах) и впишите это значение в отчетную таблицу.

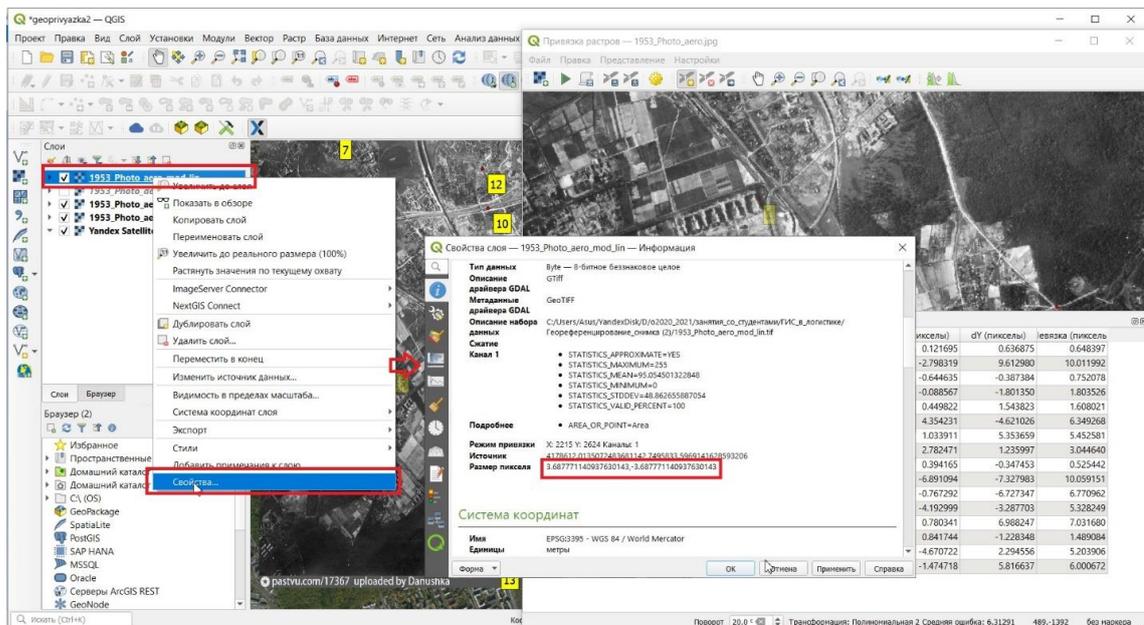


Рисунок 2.14 – Окно свойств растра

- 26) Сохраните проект.
- 27) Проанализируйте результаты геопроецирования.

Задание:

1. Составить таблицу, в которой будут представлены максимальные абсолютные точности привязки для трех выбранных методов трансформации.
2. Исследовать какие изменения произошли на территории, которая зафиксирована на архивном аэрофотоснимке.
3. Представить в форме таблицы с изображениями 4–5 найденных изменений в период с момента съемки архивного аэрофотоснимка до текущего момента.
4. Привести текстовое описание отмеченных изменений.

### Контрольные вопросы к упражнению:

1. Назовите главное отличие геоинформационных систем от информационных систем?
2. Назовите две составляющие пространственных данных и как они связаны между собой?

3. Дайте определение растровой модели данных. Какова ее структура?
4. Дайте определение векторной модели данных. Какие пространственные объекты лучше всего представляются ею?
5. Как осуществляется географическая привязка растра? Опишите последовательность шагов.
6. Что такое дистанционное зондирование, чем обусловлена ценность данных ДЗ? Как взаимосвязаны данные дистанционного зондирования с картографией и геинформатикой?

### **РАЗДЕЛ 3. Упражнение. Анализ результатов использования различных методов интерполяции в QGIS**

**Цель упражнения:** научиться на основе точечных данных восстанавливать поля распределения непрерывных показателей различными способами. Используя данные SRTM о рельефе, скачанные с архива данных дистанционного зондирования EarthExplorer, необходимо построить с помощью инструментов ПО ГИС шесть интерполяционных поверхностей с применением 2-х методов интерполяции, провести исследование полученных поверхностей и сделать выводы о том, какой метод наилучшим образом «предсказал» отметки высоты рельефа на исследуемой территории.

#### **Задачи упражнения:**

1. Скачать исходные данные к упражнению;
2. Вырезать из исходных данных поднабор данных (проводим уменьшение экстенда территории с целью сократить трудоемкость анализа);
3. Извлечь из растровой поверхности наборы данных с помощью рандомно сгенерированных геоточек, по которым затем провести интерполяцию (наборы отличаются количеством исходных геоточек);
4. Провести интерполяцию созданных точечных наборов двумя различными методами (TIN, IDW)
5. Проанализировать построенные интерполяционные поверхности.

**Исходные данные:** данные SRTM (тайл n51\_e046\_47\_1arc\_v3), шейп файл с границами Марксовского района (marksovsky\_district.shp) и файл с границами тестового полигона. (test\_poly.shp)

## Алгоритм:



Рисунок 3.1 - Алгоритм выполнения упражнения

**Результат:** Шесть интерполяционных поверхностей, построенные тремя методами интерполяции на 2-х поднаборах данных, извлечённых из исходного датасета.

## Введение

Современная геостатистика – это быстро развивающаяся область прикладной статистики с большим набором методов, моделей для анализа, обработки и представления пространственных данных. Опора на геостатистический анализ позволяет значительно повысить уровень надежности и качество решений, принимаемых при использовании пространственно-распределенных данных. Спектр применения геостатистики – от традиционного использования в области геохимии ландшафта и оптимизации добычи природных ископаемых до современных приложений в социологии, экономике, экологии, медицине, финансах, эпидемиологии и т. д.

В последние годы геостатистические методы активно используются в почвоведении и экологии – при изучении структуры почвенного покрова, пространственной организации почвы и ее трансформации во времени, закономерностей пространственного варьирования агроэкологического

качества почв, их химического состава и гидрофизических параметров, микроклиматических и микробиологических особенностей, уровня загрязнения и устойчивости к деградации и загрязнению.

Известно достаточно много различных методов пространственной интерполяции. Некоторые из них являются весьма гибкими и могут приспособливаться к различным аспектам образцов данных. Другие являются более ограничительными и требуют, чтобы данные соответствовали определенным условиям.

Пространственная интерполяция — это широко используемая методика ГИС для создания непрерывной поверхности из дискретных точек. Многие реальные явления в мире являются непрерывными: высоты, почвы, температуры и т. д. Если требуется создать соответствующие модели этих поверхностей для их последующего анализа, то, сначала проводят полевые измерения в характерных точках соответствующего экстенда, затем промежуточные значения рассчитываются посредством методов, называемых «пространственной интерполяцией».

### **Метод**

QGIS обладает широким спектром функций по статистическому анализу, проведению выборок из массивов данных, а также пространственной геостатистической обработке. Описанные функции представлены как в собственных модулях программы, так и в плагинах, подключающих возможности сторонних ГИС.

### **Задание**

В нижеприведенном упражнении предлагается построить интерполяционные поверхности используя два различных метода интерполяции и оценить полученный результат, сравнив рассчитанные поверхности между собой и с исходной «воспроизводимой» поверхностью.

Датасеты геоточек, необходимые для проведения интерполяции извлекаются из исходных данных SRTM путем генерации рандомного набора геоточек, в атрибутивные данные которых извлекается информация из исходной растровой поверхности. Генерация геоточек в наборы осуществляется с разной частотой.

Последовательность шагов выполнения задания включает следующие:

- ✓ генерация двух геодатасетов с разным количеством точек;
- ✓ интерполяция двух геодатасетов двумя методами;
- ✓ сравнение полученных интерполяционных поверхностей между собой и с «воспроизводимой» исходной поверхностью.

Последовательность шагов выполнения упражнения:

- 1) Откройте новый проект в QGIS (рис. 3.2) и добавьте в качестве базовой карты любое покрытие космических снимков, например Yandex Satellite (Яндекс спутник).

*Комментарий. Для добавления базовой карты, в окне поиска QMS необходимо ввести название источника Yandex Satellite и, после чего нажать кнопку «Добавить», расположенную напротив его названия.*

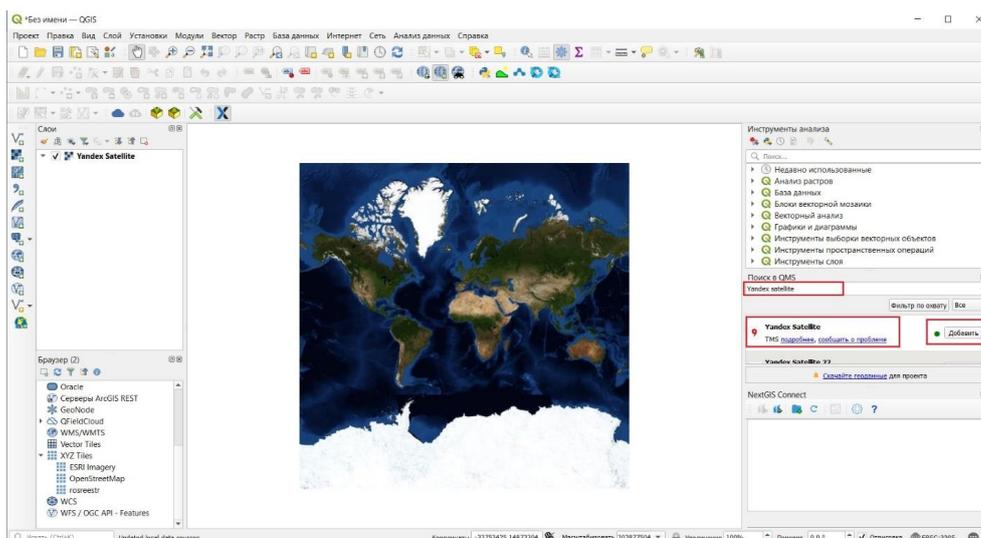


Рисунок 3.2– Открытие нового проекта в QGIS и добавление базовой карты

- 2) Добавьте в проект набор данных SRTM (n51\_e046\_47\_1arc\_v3\_PR.tif).

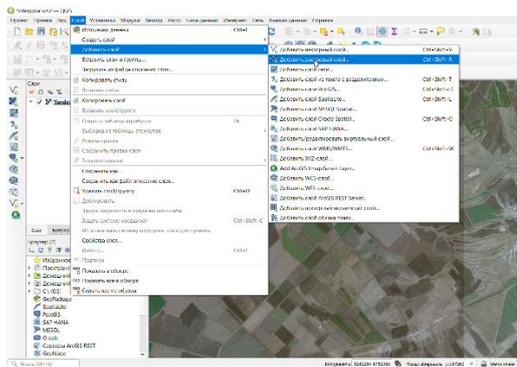
*Комментарий.* Данные о рельефе представляют собой растровые геоданные, где каждому элементу растра (пикселу) соответствует высота над поверхностью принятой модели геоида. (рис. 3.3а). В данном упражнении в качестве источника данных о рельефе были выбраны геоданные, полученные с помощью миссии STRM.

*Shuttle radar topographic mission (SRTM) – радарная топографическая съемка большей части территории земного шара, за исключением самых северных (>60), самых южных широт (>54), а также океанов, произведенная за 11 дней в феврале 2000г с помощью специальной радарной системы. Двумя радиолокационными сенсорами SIR-C и X-SAR, было собрано более 12 терабайт геоданных.*

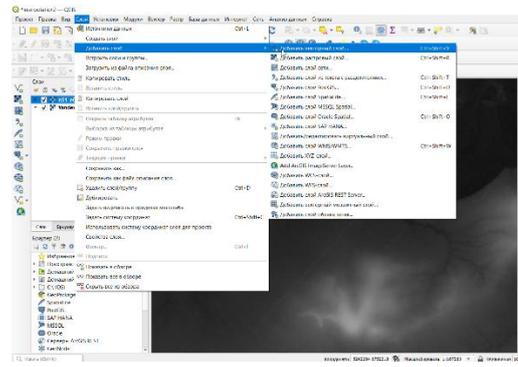
*SRTM 1 Arc-Second Global (номер цифрового идентификатора объекта (DOI): /10.5066/F7PR7TFT) обеспечивают глобальный охват данных, с заполненными пустотами, с разрешением 1 угловая секунда (30 метров).*

- 3) Добавьте также два векторных слоя (marksovsky\_district.shp test\_poly.shp).

*Комментарий.* Векторные файлы представляют собой границы Марксовского района Саратовской области и файл с границами тестового полигона для «вырезания» набора данных из тайла SRTM. Уменьшение экстенда растра позволит уменьшить время расчёта и объем выходных данных (рис. 3.3б).



а



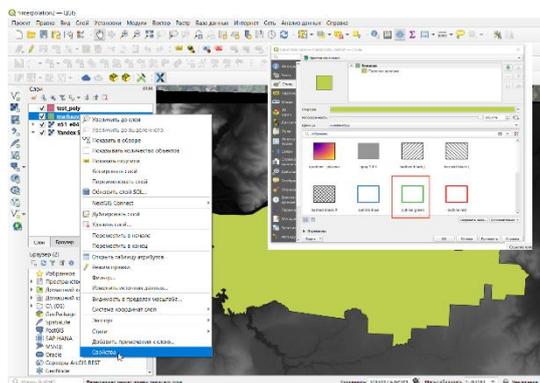
б

Рисунок 3.3 – Добавление в проект растровых и векторных геоданных.

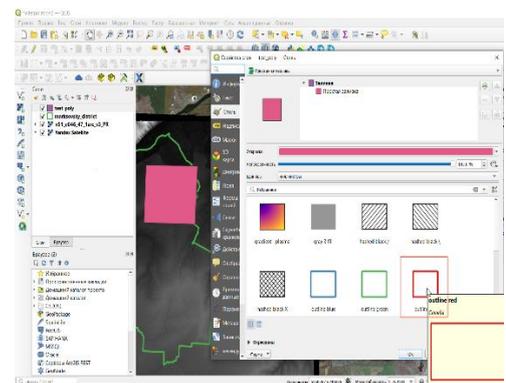
*Комментарий.* При добавлении растровых геоданных рельефа они отображаются в монохромной палитре (низкие значения отметок высот отображаются темнее, высокие – более светлыми оттенками).

4) Поменяйте символы для векторных слоев так, чтобы они отображались только границами полигонов, без заливки.

*Комментарий.* Для изменения символа нажмите правой кнопкой мыши на название слоя в таблице слоев и выберите «Свойства». В открывшемся меню выберите символ (рис. 3.4).



а



б

Рисунок 3.4 –Изменение символов для отображения векторных данных.

5) Отдалите карту так, чтобы в видимом экстенсте окна визуализации была отображена территория, в границах тестового полигона. Для

этого нажмите правой кнопкой мыши на название слоя в таблице слоев и выберите «Увеличить до слоя» (рис. 3.5).

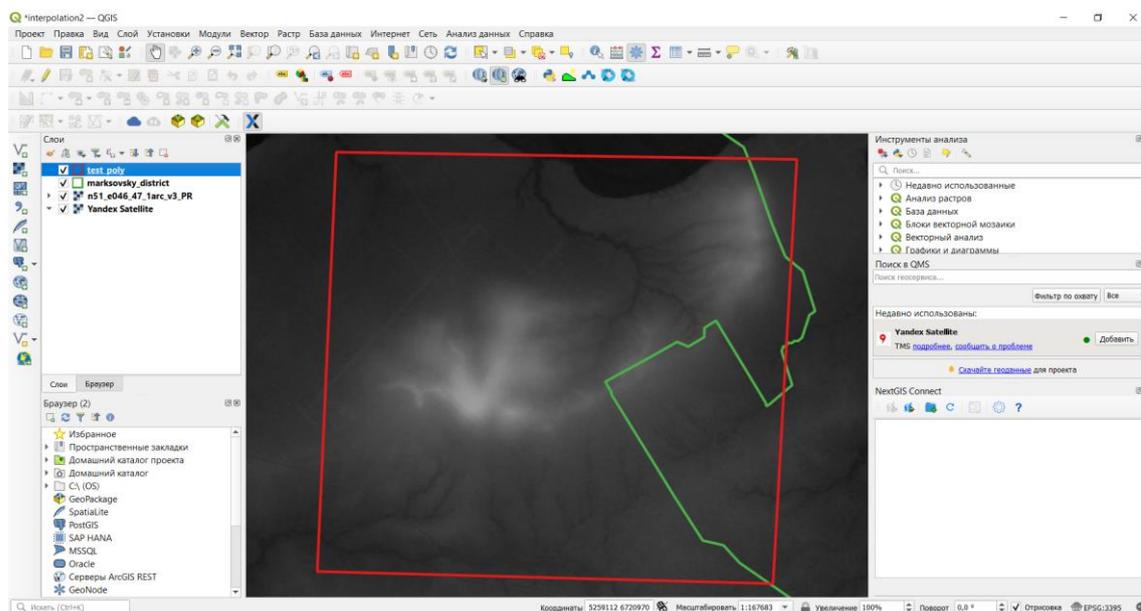


Рисунок 3.5 – Визуализация добавленных слоев в проект

б) Сохраните проект, указав путь к выбранному месту его хранения, задав название проекта «interpolation». Произведите извлечение из данных о рельефе поднабора данных, ограничиваемого тестовым полигоном для сокращения времени расчетов.

*Комментарий.* Для этого перейдите на вкладку «Растр» и выберите «Извлечение» → «Кадрировать растр по маске» (рис. 3.6).



7) Создайте из нашей исследуемой области набор точек для последующей интерполяции. Для этого используйте инструмент Raster Values to Points (random) с двумя значениями частоты – 100 и 1000 (рис. 3.8). Это позволит сгенерировать два набора точек, различающихся по количеству исходных геоданных для последующего построения интерполяционной поверхности (points\_f100.shp и points\_f1000.shp).

*Комментарий. Данный инструмент Raster Values to Points (random) не только генерирует слои с геоточками внутри заданного экстенда, но и производит извлечение значения растра в местоположении созданного точечного объекта. Таким образом мы получаем данные с высотными отметками в каждом наборе точек.*

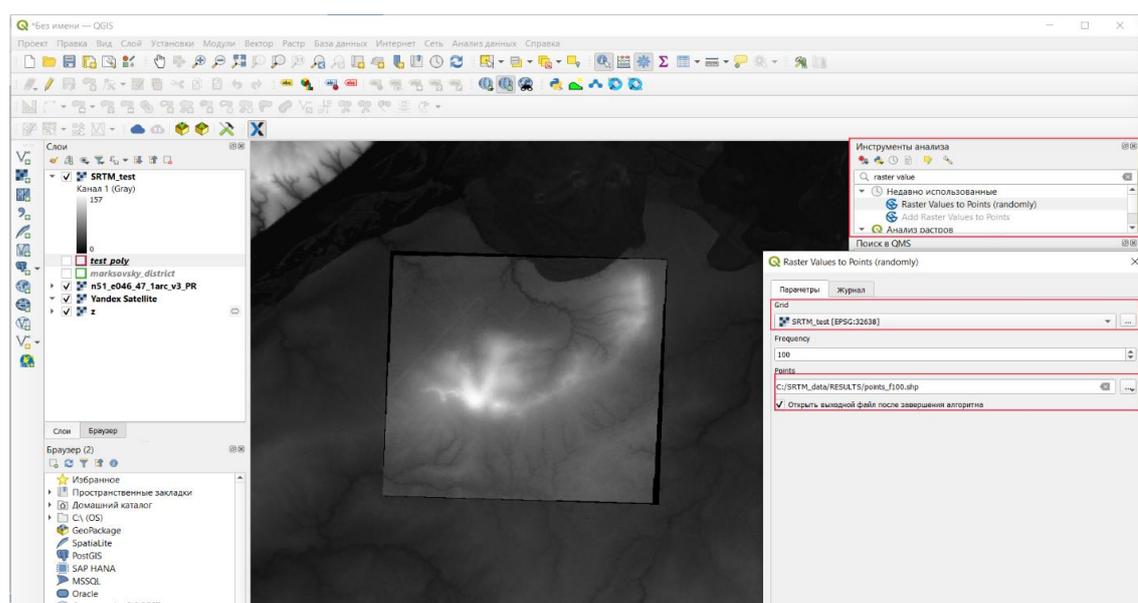


Рисунок 3.8– Инструмент Raster Values to Points (random)

*Комментарий. Для последующего анализа данных на независимых геоточках, неиспользованных при интерполяции, сгенерируйте еще один набор данных с частотой 1000 (points\_f1000\_test.shp). Поскольку точки генерируются рандомно, то наборы точек points\_f1000.shp и points\_f1000\_test.shp будут различаться. (рис. 3.9).*

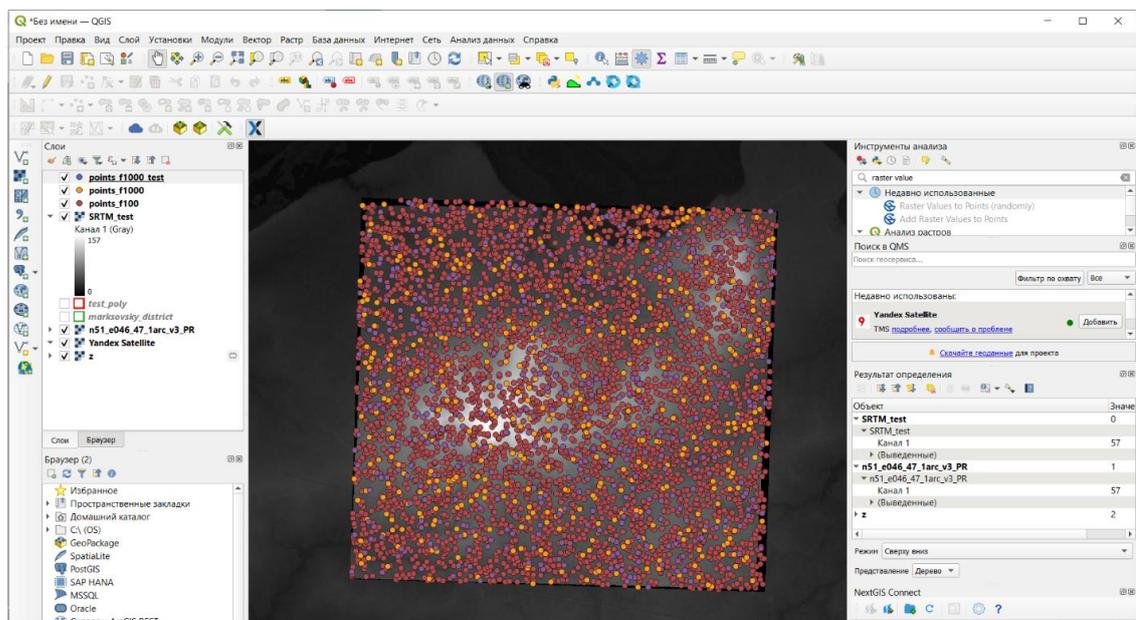


Рисунок 3.9 – Проект с добавленными слоями сгенерированных рандомных геоточек с извлеченными значениями исходного растра

- 8) Проанализируйте данные (какое количество геоточек сгенерировано в каждом из слоев, каков диапазон значений). Для этого нажмите правой кнопкой мыши на название слоя в таблице слоев и выберите «Открыть таблицу атрибутов» (рис. 3.9).
- 9) Если вы внимательно посмотрите на геоданные, то заметите, что некоторые геоточки попадают на границу растрового слоя, там, где данных нет или они сильно искажены (краевой эффект) (рис. 3.10). Удалите эти геоточки из геодатасетов данных для того, чтобы они не исказили последующий результат интерполяции;

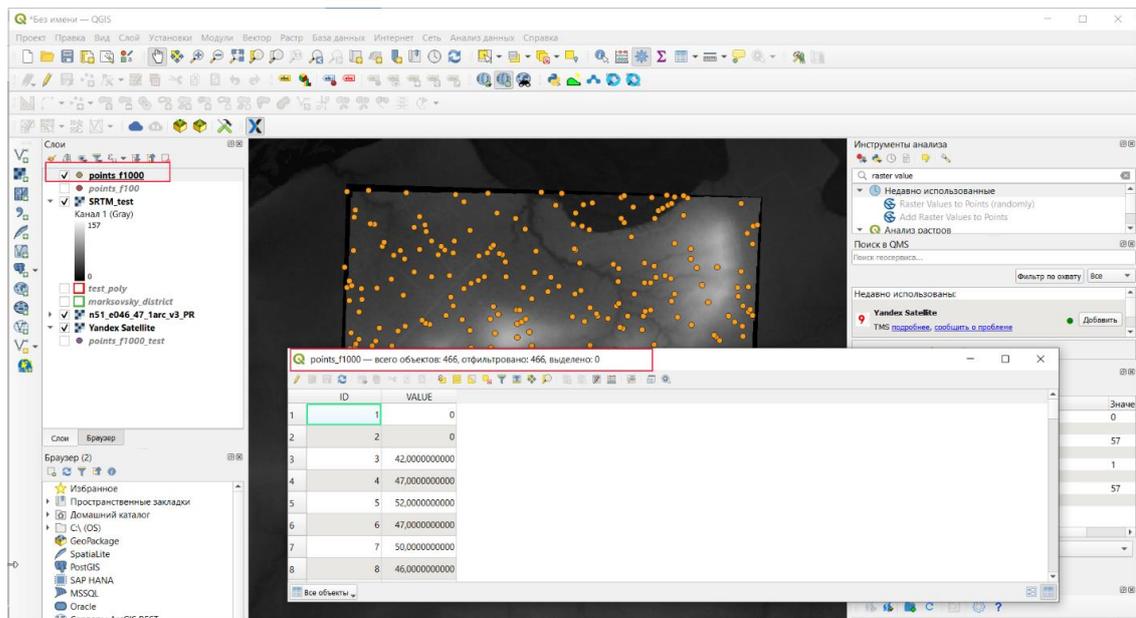


Рисунок 3.10– Таблица атрибутов слоя points\_f1000\_test.shp

*Комментарий. Для этого в атрибутивной таблице нажмите на пиктограмму редактирования и запустите соответствующий режим. С помощью фильтра отфильтруйте геоточки со значениями поля «VALUE» < 15 и удалите геоточки, которые соответствуют данным критериям (рис. 3.11).*

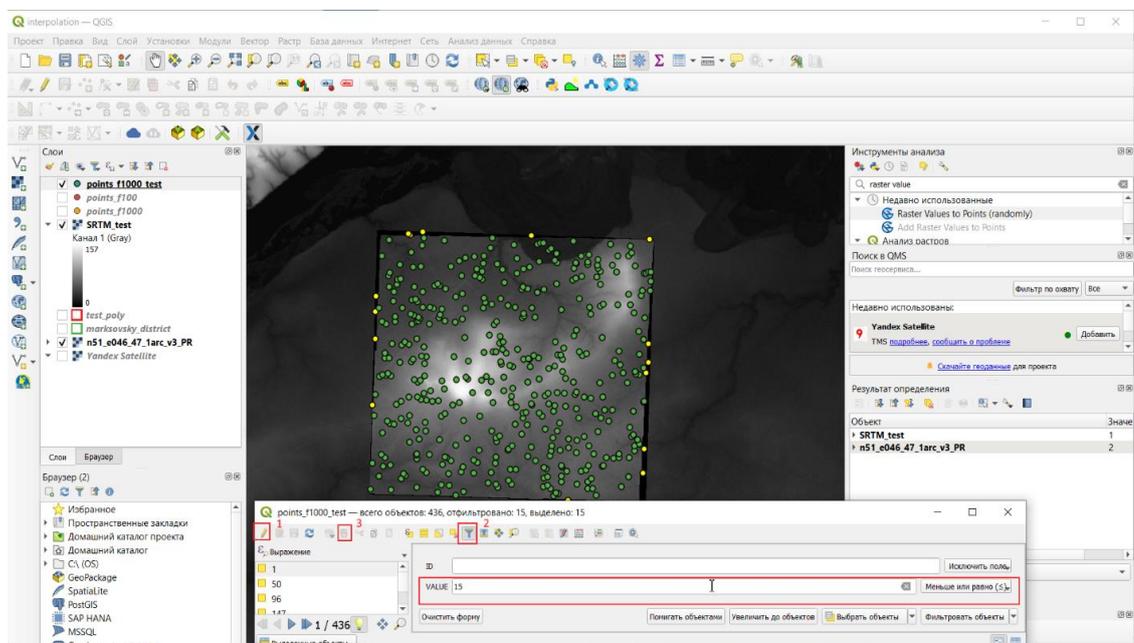


Рисунок 3.11– Очистка точечных слоев от объектов по краям растровых данных

- 10) Проведите интерполяцию двумя различными методами на этих двух наборах геоданных.
- 11) Интерполяция по методу обратно взвешенных расстояний (ОВР) определяет значения ячеек с использованием линейно взвешенной комбинации значений из поднабора опорных геоточек. Вес – это функция обратного расстояния. Интерполируемая поверхность должна представлять собой поверхность пространственно-зависимой переменной. Этот метод предполагает, что влияние картируемой переменной уменьшается по мере удаления от местоположения образца (рис. 3.12, 3.13).

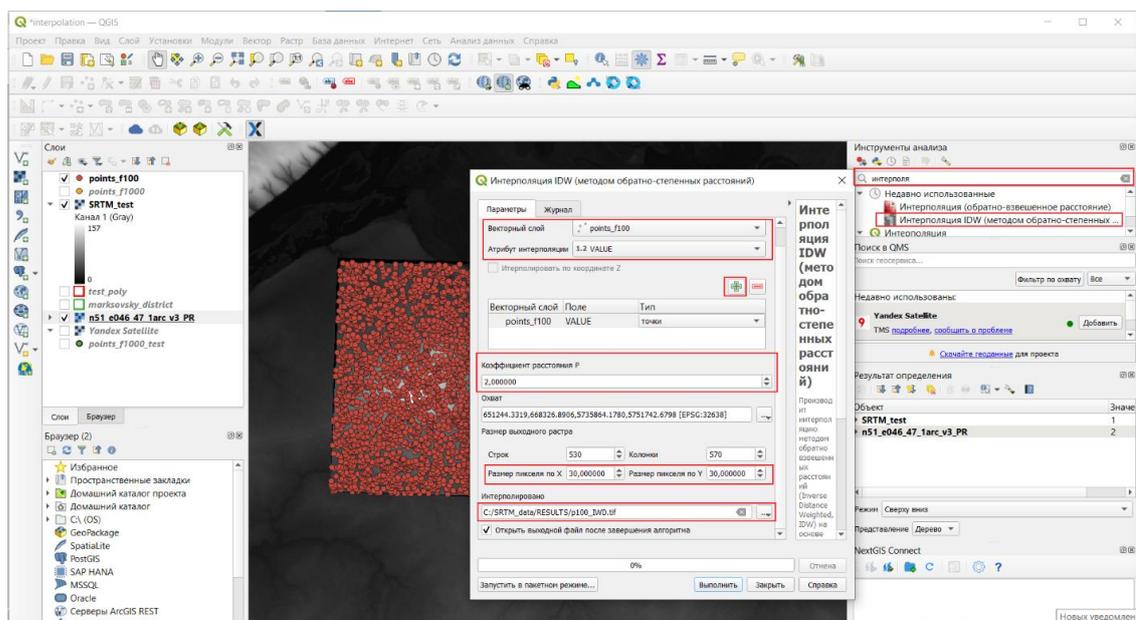


Рисунок 3.12 – Интерполяция по методу обратно взвешенных расстояний (ОВР) набора геоданных points\_f100

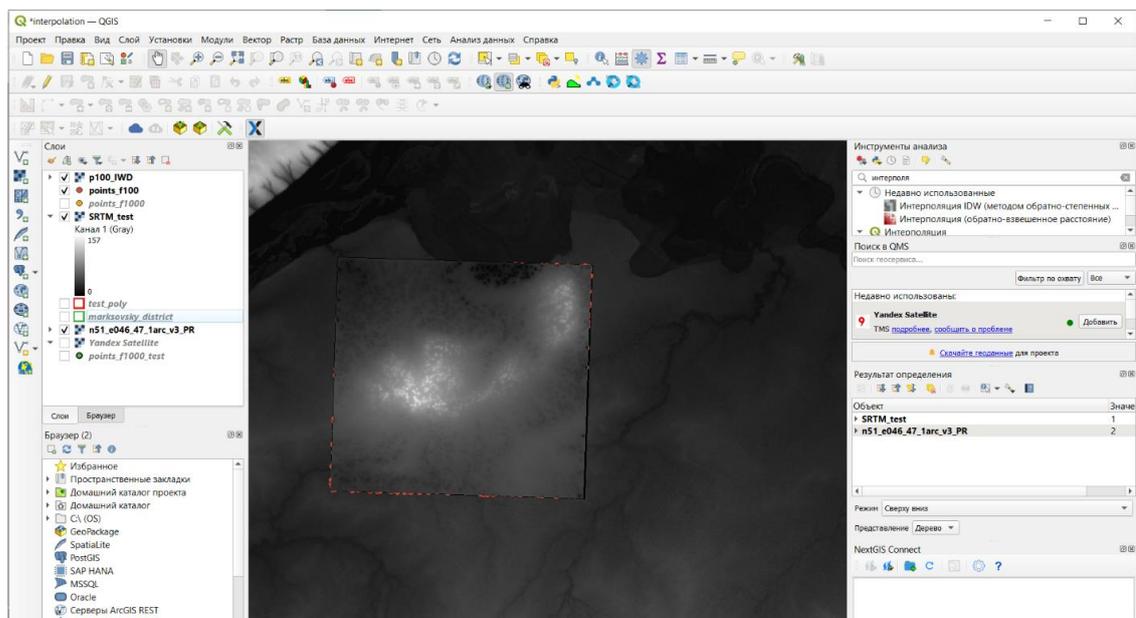


Рисунок 3.13 – Добавленный интерполяционный слой набора геоточек points\_f100 по методу обратно взвешенных расстояний (ОВР) с коэффициентом расстояния =2

- 12) Проведите интерполяцию этим же методом и с теми же значениями параметров на наборе геоточек points\_f1000.
- 13) Следующим шагом изменим значение коэффициента расстояния на 10 и также проинтерполируем оба набора геоданных.
- 14) Проведем интерполяцию двух наборов данных с помощью интерполяции методом триангуляции. Интерполяция TIN - производит интерполяцию нерегулярной триангуляционной сети (Triangulated Irregular Network - TIN) по векторному слою геоточек (рис. 3.14).

С помощью метода TIN возможно создать поверхность из треугольников ближайших соседних точек. Для этого вокруг выбранных точек создаются окружности и их пересечения соединяются в сеть непересекающихся друг на друга и при этом как можно более компактных треугольников. Результирующие поверхности негладкие. Алгоритм создает как растровый слой интерполированных геоданных.

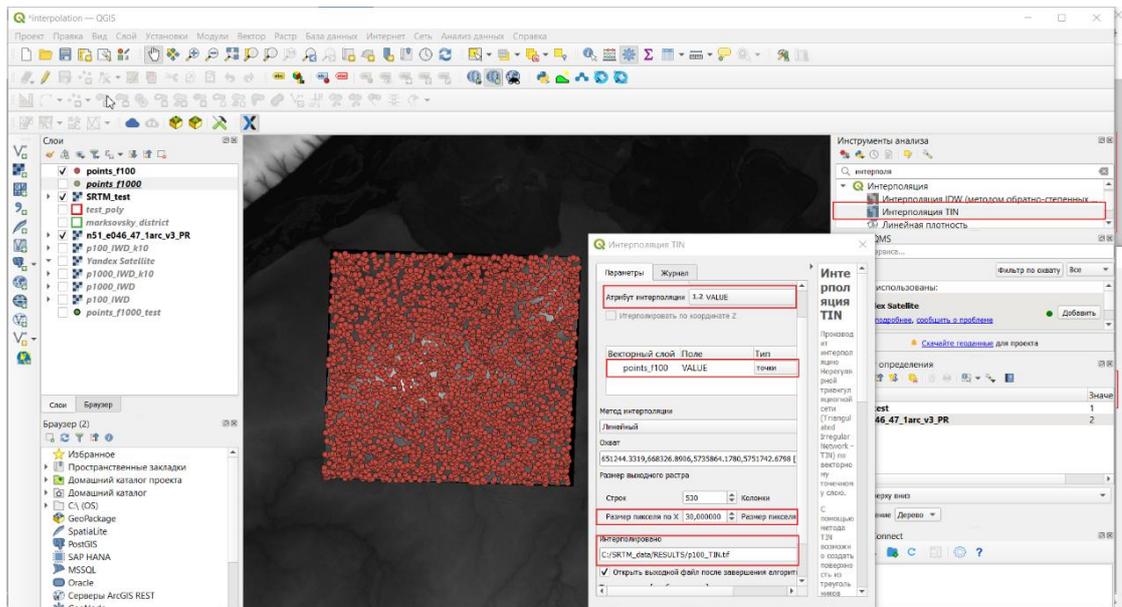


Рисунок 3.14 – Интерполяция по методу TIN набора данных points\_f100  
*Комментарий. Мы получили 6 интерполяционных поверхностей двух наборов исходных геоданных.*

- 15) Воспользуемся инструментом построения профиля для исследования растровых поверхностей. Проверьте, что данный модуль у вас установлен. Для этого во вкладке «Модули» перейдите в «Установленные» (рис. 3.15). Если модуль Profile tool отсутствует в списке, установите его.

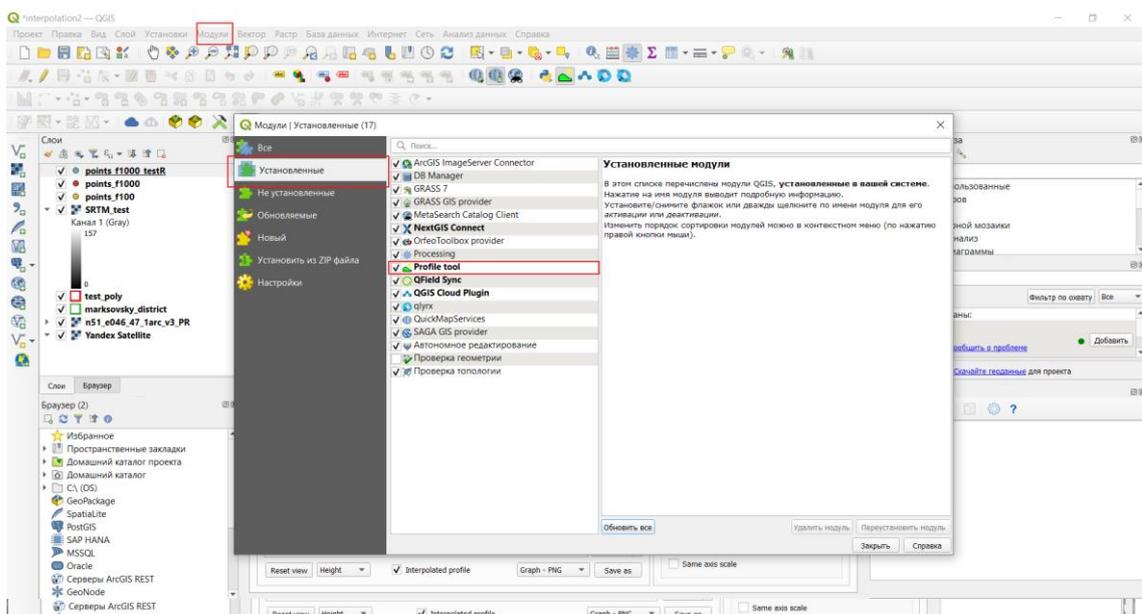


Рисунок 3.15 – Проверка установки модуля Profile tool

- 16) Для отображения и анализа данных выберем контрастные цвета для построения профилей с интерполяционными поверхностями на едином графике (рис. 3.16).

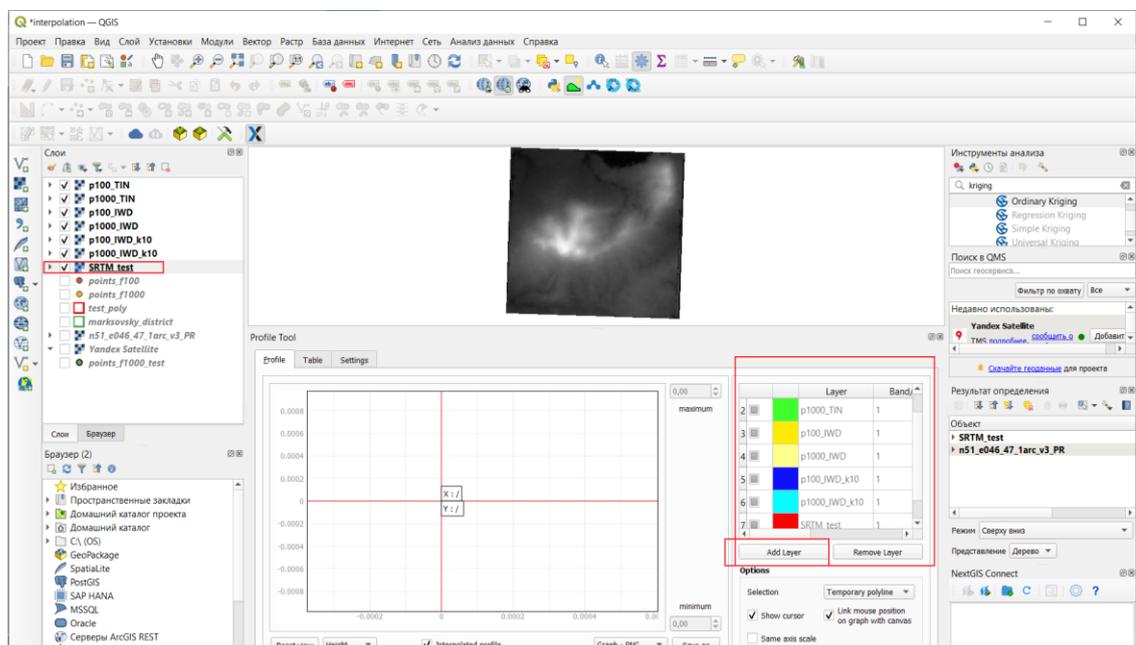


Рисунок 3.16 – Выбор символов для отображения профилей анализируемых поверхностей

*Комментарий.* Для добавления слоя в список слоев для последующего отображения профиля, подсветите слой в таблице содержания и затем нажмите кнопку «Add layer». Слой будет добавлен в список. Желательно интерполяционным поверхностям одного набора геоданных давать близкие цвета, отличающиеся интенсивностью. Добавьте все 6 интерполированных поверхностей и исходные геоданные SRTM\_test.

- 17) Теперь проведем линию, вдоль которой будут строиться сечения нашей поверхности. Нанесите линию так, чтобы она проходила через низкие и высокие отметки исходных геоданных (рис. 3.17).



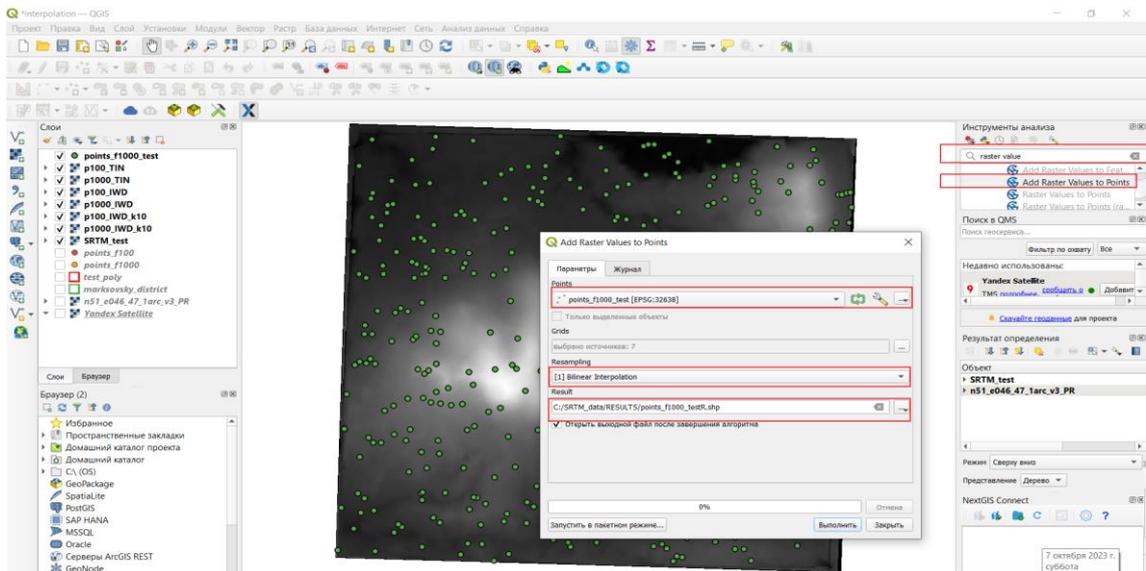


Рисунок 3.19 – Инструмент «Add Raster Values to Points»

*Комментарий. Добавьте полученный слой в проект и исследуйте его с помощью инструмента «Определить объекты». Откройте атрибутивную таблицу слоя, убедитесь, что в таблицу добавились геоданные, считанные с исследуемых поверхностей (рис. 3.20).*

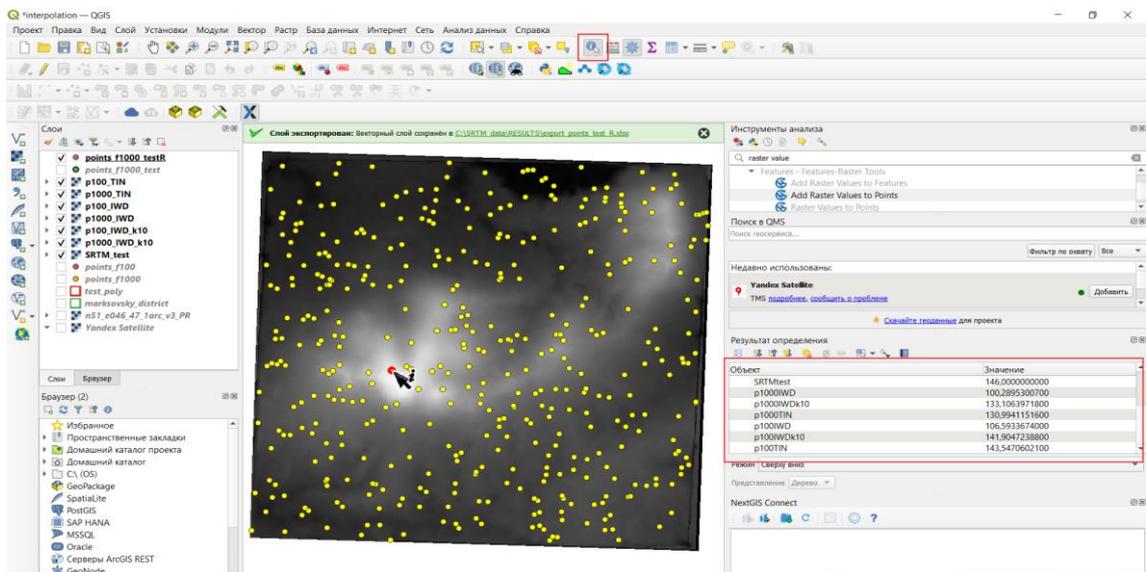


Рисунок 3.20 – Исследование точек тестового слоя

19) Экспортируем атрибутивную таблицу полученного слоя для последующего анализа. Для этого нажмите на название слоя и выберите «Экспорт», далее «Сохранить объекты как...». Выберите подходящий вам формат файла для экспорта (.csv,.xlsx...) (рис. 3.21).

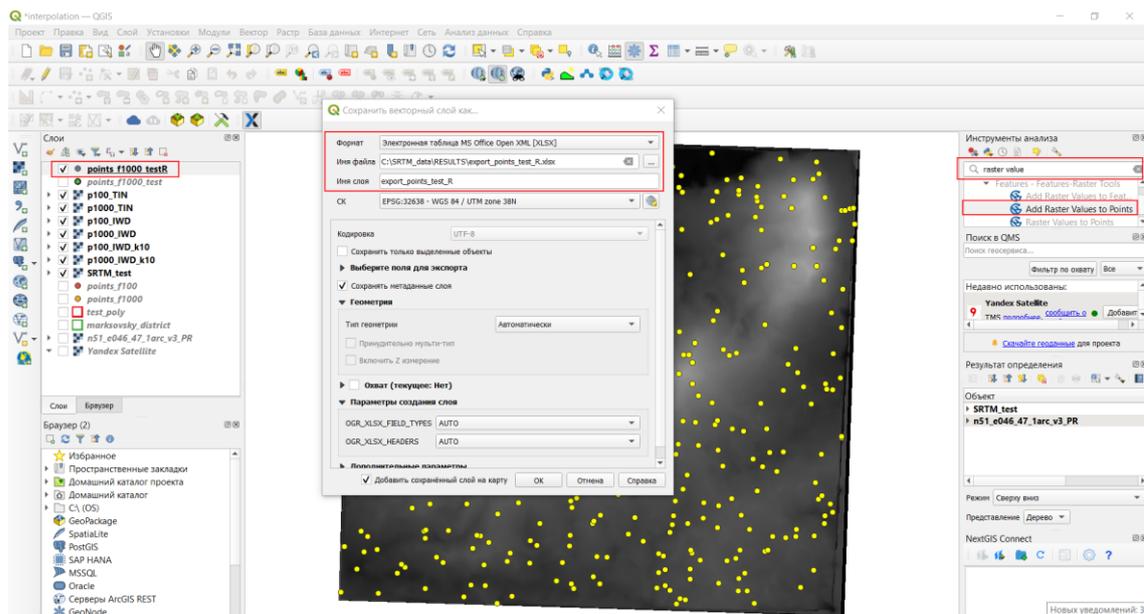


Рисунок 3.21– Экспорт атрибутивной таблицы слоя

- 20) Сохраните проект.
- 21) Проанализируйте результаты интерполяции.

Задание:

Проведите сравнительный анализ шести интерполяционных поверхностей и сформулируйте выводы о результатах проведенной интерполяции. Проиллюстрируйте сформулированные выводы скринами из проекта QGIS.

### Контрольные вопросы к упражнению:

1. Что такое интерполяция и в каких задачах она используется?
2. Как работает метод обратно взвешенных расстояний?
3. Как работает метод TIN?
4. Опишите отличия созданных растровых поверхностей. Какая из растровых поверхностей наиболее хорошо повторяет исходную ЦМР?

## **РАЗДЕЛ 4. Упражнение. Проведение гидрологического анализа на основе цифровой модели рельефа SRTM в QGIS**

**Цель упражнения:** получить навыки а) отображения растровых геоданных ЦМР заданного экстенда территории; б) использования цифровой модели рельефа для автоматической оцифровки центральных линий водотоков, а также соответствующих им границ водосборных территорий; в) визуализировать полученные результаты в 3-d представлении.

### **Задачи упражнения:**

1. Скачать исходные данные к упражнению;
2. Построить синтетическую речную сеть и очертить границы водосбора для заданной геоточки устья р. Ибрета с помощью инструментов ПО QGIS.
3. Визуализировать результаты гидрологического анализа в 3-d представлении с помощью модуля Qgis2threejs.

**Исходные данные:** геоданные SRTM на исследуемую территорию бассейна р. Ибрета (Рязанская область) и файл с геоточкой устья (outlet.shp).

**Результат:** Картограмма водотоков и водосборных бассейнов, построенная по цифровой модели рельефа, визуализированная в 3-d виде.

### **Введение**

Водосборные территории (водосборы), границы водосборов (водоразделы), а также речные бассейны представляют собой участки земной поверхности, связанные с речной сетью и иными водными объектами. Водосборная территория – это участок земли, на котором происходит сбор воды, которая определенным образом стекает в речную систему или водоем. Одно из основных свойств водосборной территории состоит в связи характеристик ее рельефа с находящимися на ней поверхностными водными объектами, картографическое представление которой соответствует

поступлению в эти объекты поверхностного стока с питающих их водосборов. Определение границ водосборов, а также их площадей и уклонов используется при решении целого ряда гидрологических и экологических задач, а также задач, связанных с ведением сельского хозяйства.

Границы водосборных территорий используются в гидрологических расчетах для оценки количественных характеристик водных ресурсов, прогноза минимальных и максимальных расходов, а также для многих иных приложений, направленных на решение социальных, экономических, экологических и политических задач.

Достоверные границы водосборных территорий имеют принципиальное значение для получения корректных результатов гидрологического моделирования, например, для определения возможности и организации использования небольших водохранилищ (прудов) на местном стоке с целью последующего их использования для ведения орошения на сельскохозяйственных землях.

Антропогенная деятельность оказывает значительное влияние на состояние и функционирование водосборных территорий (рис. 4.1). Деятельность человека, в том числе трансформация природных объектов, зачастую, приводят к изменениям гидрологического режима водных объектов. В свою очередь это оказывает негативное воздействие на характеристики нижерасположенных водных объектов, а также на их экологическом состоянии.

Одним из наиболее часто встречающихся негативных проявлений антропогенной деятельности на водосборных территориях заключается в нарушении естественных ландшафтов. Застройка территории, изменение вида землепользования, добыча полезных ископаемых и другие виды хозяйственной деятельности приводят к утрате природной способности ландшафта к удержанию, фильтрации, очистке и отдаче воды в нижерасположенные водные объекты. Зачастую это приводит к изменениям

гидрологических режимов этих водных объектов, которое проявляется в ухудшении качества и количества водных ресурсов.

Повышение уровня загрязнения воды на водосборных территориях также является следствием антропогенной деятельности. Промышленные и сельскохозяйственные сточные воды, выбросы отходов и химических веществ, а также несанкционированная вырубка лесов и возникновение неуправляемых свалок создают предпосылки ухудшения качества воды и нарушения экологического природного равновесия на водосборах.

Нарушение водного режима и деградация водоносных горизонтов грунтовых и поверхностных вод являются еще одними из последствий деятельности человека на водосборах. Проектирование и строительство гидротехнических сооружений, отвод воды для хозяйственных и промышленных нужд, а также неконтролируемая эксплуатация водных объектов приводят к изменению водообмена водоносных горизонтов, сокращению запасов подземных вод, а также ухудшению качества их вод.

Для минимизации негативного влияния антропогенной деятельности на водосборах, на этапе проектирования объектов хозяйственной деятельности, проводят экологические обследования, а также реализуют задачи по оценке допустимых воздействий на водные объекты и проектируют мероприятия по снижению негативных воздействий. Например, строительство очистных сооружений, мероприятия по регенерации почв, восстановлению природных ландшафтов и пр.

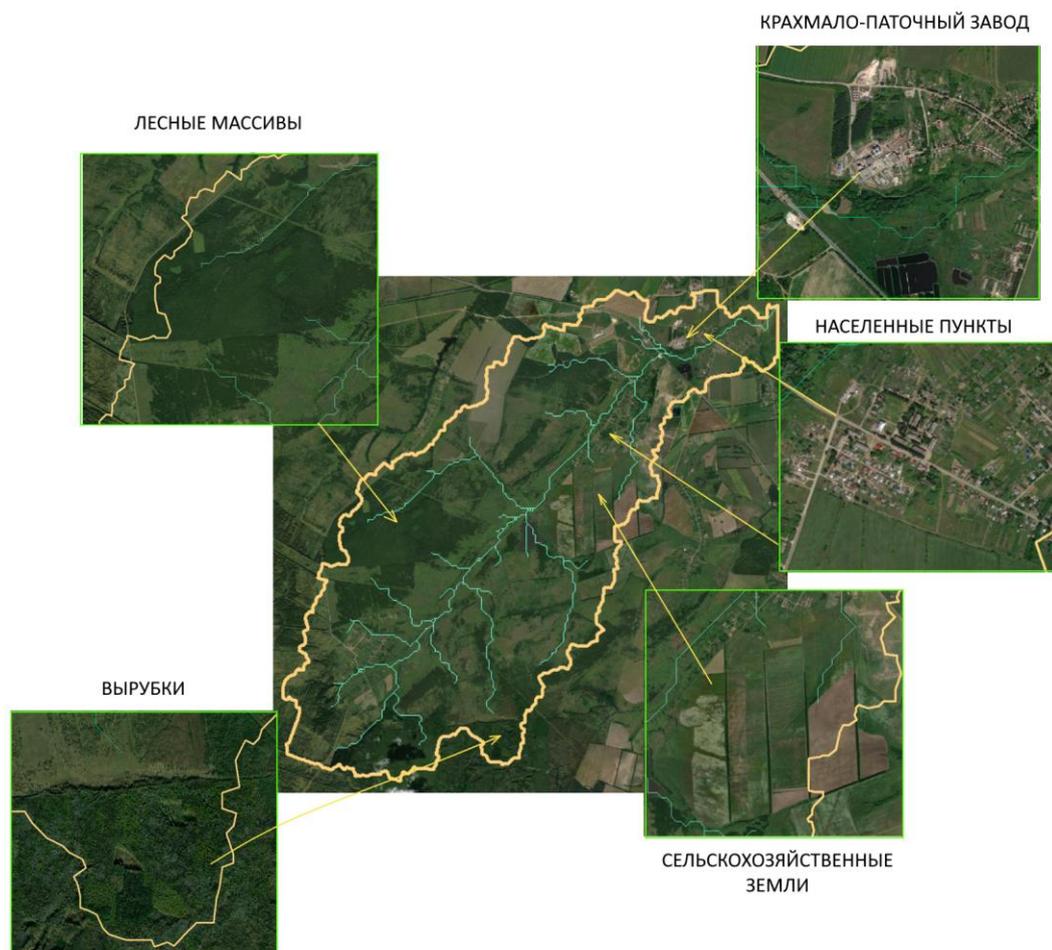


Рисунок 4.1 – Пример размещения объектов на водосборной территории

Традиционный способ ручного выделения границ водосборов по топографической карте основан на анализе контурных линий. Стрелки, представляющие направления водного потока по земной поверхности проводятся перпендикулярно к каждой контурной линии, в направлении наибольшего уклона (наибыстрейшего спуска). Местоположение водораздельных границ определяется в местах, где соседние стрелки указывают противоположные направления (рисунок 4.2).

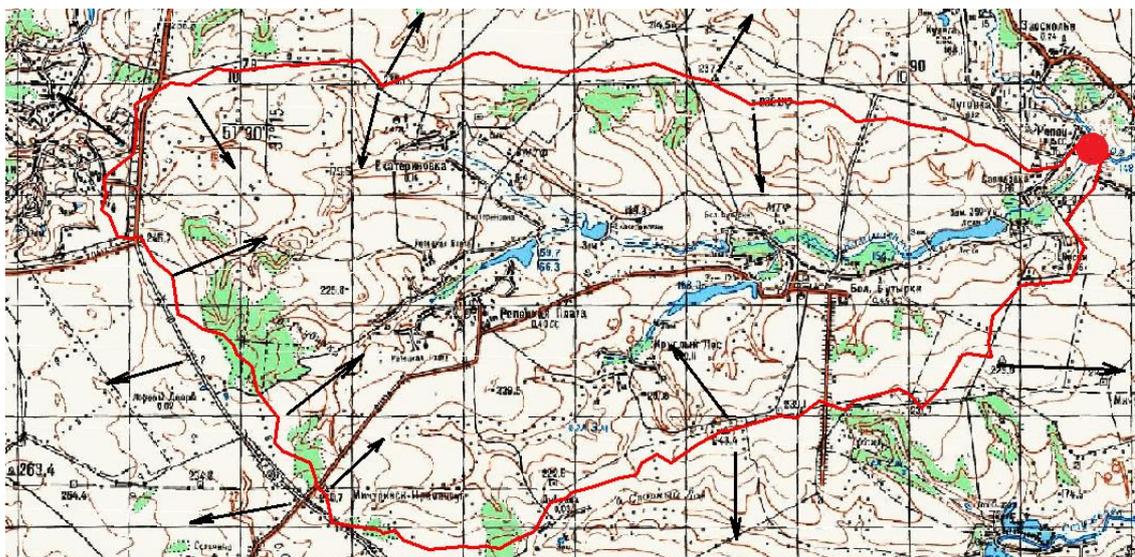


Рисунок 4.2 - Результаты ручного выделения водосборной территории на бумажной топографической карте

Вычерчивание границ водоразделов вручную представляет собой кропотливый и непростой процесс, и различного рода ошибки неизбежны, а их уровень зависит от квалификации и опыта выполняющего. Часто различные специалисты при обработке одних и тех же карт получают разные результаты.

В настоящее время операции выделения границ водосборных территорий автоматизированы и выполняются с помощью ГИС-технологий и функциональных возможностей специализированного программного обеспечения. В качестве растровых данных используются цифровые модели рельефа (ЦМР), получаемые по данным интерферометрической съемки земной поверхности с воздушных или космических платформ и ее последующей специальной обработки. Одним из примеров ЦМР, полученной в результате космической съемки, являются так называемые данные SRTM.

Важным достоинством ЦМР является их непрерывность. Это позволяет разрабатывать и применять для их обработки специальные приложения. Обработка ЦМР с помощью таких приложений позволяет автоматизировать процесс анализа ЦМР и получать однозначные результаты, не зависящие от пользователя. Достоверность результатов компьютерного анализа зависит от

точности и пространственного разрешения исходных данных. В ряде случаев пространственное разрешение используемой ЦМР может быть недостаточным для решения тех или иных задач. В этих случаях используют данные получаемые лидарной съемкой или прибегают к улучшению путем использования информации с топографических карт и данных, полученных с помощью БПЛА.

### **Цифровые модели рельефа**

В связи с развитием технологий активного дистанционного зондирования, а также доступностью компьютерной обработки больших по объему массивов отметок высот, становится реально выполнимой задача создания максимально приближенной к действительности цифровой модели рельефа (ЦМР).

Цифровая модель рельефа - (Digital Terrain Model, DTM; Digital Elevation Model, DEM; Digital Terrain Elevation Data, DTEM) ~ средство цифрового представления 3-мерных пространственных объектов (поверхностей, рельефов) в виде трехмерных данных (three-dimensional data, 3-dimensional data, 3-d data, volumetric data) как совокупности высотных отметок (heights, spot heights) или отметок глубин (depths, spot depths) и иных значений аппликant (координаты Z) в узлах регулярной сети с образованием матрицы высот (altitude matrix), нерегулярной треугольной сети (TIN) или как совокупности записей горизонталей (изогипс, изобат) или иных изолиний (contours, contour line, isoline, isarithms, isarithmic lines).

В картографии под ЦМР любого географического поля, в том числе и рельефа, понимается определенный формат представления исходных данных и способ их структурного описания, позволяющий вычислять (восстанавливать) значения поля в заданной области путем интерполирования и/или экстраполирования. В последнем случае в круг определения ЦМР, таким образом, включаются форма задания исходных данных и способ вычисления значений поля в заданных геоточках.

Под цифровой моделью рельефа - ЦМР (в англоязычной научной литературе Digital Elevation Model - DEM или Digital Terrain Model - DTM) в технологии географических информационных систем обычно понимают цифровое представление топографической поверхности в виде растра или регулярной сети ячеек заданного размера.

Исходными данными для построения ЦМР могут быть:

- результаты наземной площадной съемки, выполненной электронными геодезическими приборами;
- результаты стереофотограмметрической съемки (аэросъемки);
- данные дистанционного зондирования;
- сканирование картографических материалов;
- ввод массива координат точек вручную.

В связи с этим возможны три основных формы задания этих данных.

### **Регулярное расположение точек ЦМР**

Регулярное расположение точек на прямоугольных, треугольных и шестиугольных сетках обычно получают при тахеометрической съемке или иных специальных видах площадного нивелирования.

Регулярная ЦМР наиболее простая, она легко строится и хранится в цифровом виде. Является эффективной в случае достаточно однородной местности или в условиях городской застройки.

Недостатки регулярной ЦМР:

- ключевые геоточки рельефа (вершины, впадины, границы оврагов....) не всегда совпадают с узлами сетки;
- требуются большие трудозатраты при разбивке узловых точек на местности и определении высотных положений в каждой из них;

- в случае резко меняющегося рельефа, если размеры ячеек очень большие, то значительная часть информации может не отразиться в ЦМР (овраги);
- при уменьшении размеров ячеек на довольно однородной части рельефа будет переизбыток точек, т. е. будет занят значительный объем памяти и потребуются лишние затраты времени и труда на ввод высотных отметок в узлах сетки.

### **Нерегулярное расположение точек ЦМР**

Нерегулярное расположение точек обычно получают в результате картометрических работ по структурным линиям, профилям, центрам площадей, локальным геоточкам.

В нерегулярной ЦМР геоточки размещаются в произвольном порядке, но с заданной частотой и плотностью. Чем сложнее рельеф, тем гуще должна быть сетка. Такая ЦМР позволяет ввести все ключевые геоточки рельефа.

Недостатком нерегулярной ЦМР является то, что для каждой геоточки необходимо ввести ее номер, координаты  $x$ ,  $y$  и высотную отметку  $h$ .

### **Изолинейное расположение точек ЦМР**

Изолинейное задание точек получают, обычно, при цифровании горизонталей, когда их располагают равномерно по изолиниям или с учетом сложности их рисунка.

На введенных геоточках далее строится модель поверхности. Форма задания исходных данных о рельефе, их детальность и достоверность определяют способ пространственной интерполяции и экстраполяции в пределах исследуемой территории, а также степень адекватности построенной модели рельефа.

Пространственная интерполяция точечных данных основывается на выборе аналитической модели топографической поверхности. В общем

случае топографическая поверхность представляет собой функцию двух переменных  $Z = f(X, Y)$ , заданную в некоторых геоточках исследуемой области пространства, количество и взаимное расположение которых может быть, как отмечено выше, различным. Задача интерполяции заключается в том, чтобы построить по этим данным эту функцию для всей области, то есть задать алгоритм вычисления функции  $f(X, Y)$  в любой геоточке с координатами  $X$  и  $Y$ . В связи с невозможностью описания топографической поверхности в пределах всей территории одной функцией, для пространственной интерполяции поверхностей с регулярным расположением опорных геоточек обычно используют кусочную полиномиальную и сплайновую интерполяцию с применением кубических сплайнов. Последний метод применяется в том случае, когда опорные геоточки расположены на профилях разрезов. При нерегулярной схеме расположения опорных геоточек используется кусочная полиномиальная интерполяция с применением как ортогональных, так и неортогональных полиномов, рядов Фурье, аналитическая сплайн-интерполяция (с использованием D-сплайнов), скользящее и скользящее взвешенное осреднение и некоторые другие методы

Количество используемых методов аналитического описания топографических поверхностей, лежащих в основе пространственной интерполяции данных опорных точек и построения цифровых моделей, как следует даже из приведенного краткого обзора, достаточно велико. При этом результаты пространственной интерполяции различными методами отличаются друг от друга. Отдельную проблему составляет выбор размера ячейки раstra, определяющий степень генерализации рельефа при его моделировании. Оценка адекватности того или иного способа построения ЦМР и выбор оптимального варианта для данного характера рельефа и сути решаемых задач должны основываться на результатах сопоставления реального рельефа (либо его картографического представления) и построенных цифровых моделей.

Пространственные модели поверхности, в том числе цифровые модели рельефа (ЦМР), необходимо рассматривать во взаимосвязи с их использованием для пространственного географического анализа и картографирования.

В разнообразных прикладных задачах моделирования гидрологических процессов, противоэрозионной устойчивости почв, мелиоративных мероприятий, создания рекреационных территорий и т.д. ЦМР применяются: для определения характеристик местности, таких как значение высоты в любой геоточке, угла наклона поверхности, экспозиции склона; выделения на территории водосборных бассейнов, водоразделов, сетей поверхностного стока и русел, вершин, впадин и других элементов рельефа.

### **Применение цифровых моделей рельефа**

На основе ЦМР, в свою очередь, возможно быстрое создание серии тематических карт важнейших морфометрических показателей: гипсометрической карты, карт крутизны и экспозиций склонов, а на их основе и карт эрозионной опасности, направлений поверхностного стока, геохимической миграции элементов, устойчивости ландшафтов и т.п.

Цифровые модели рельефа позволяют производить следующие операции:

- быстрое получение данных о морфометрических показателях (высота, угол наклона, экспозиция склона) в любой геоточке модели;
- анализ крутизны и экспозиций склонов, построение «на лету» соответствующих карт;
- генерация горизонталей;
- построение профилей поперечного сечения рельефа по направлению прямой или ломаной линии;
- анализ поверхностного стока (гидрологический анализ);

- генерация сети тальвегов и водоразделов;
- расчёт объёмов;
- расчёт площадей поверхности;
- расчёт уровней и площадей затопления;
- построение трёхмерных моделей рельефа с возможностями рендеринга и драпировки поверхности как векторными объектами (гидросеть, дороги, населённые пункты, ландшафтные карты и т.п.), так и растровыми слоями (топокарты, данные дистанционного зондирования);
- создание видеоизображения «пролёта» над поверхностью модели по заданному маршруту (системы виртуальной реальности);
- анализ зон видимости с заданной точки или точек обзора и построение соответствующих карт или трёхмерных моделей;
- трансформация исходной модели путём добавления новых данных.

### **Метод**

Для выполнения гидрологического анализа используются инструменты ГИС SAGA и GRASS, подключаемые через интерфейс ПО QGIS.

### **Задание**

В нижеприведенном упражнении предлагается выделить водотоки и соответствующие им водосборные бассейны для р.Ибрёда.

Река Ибрёда протекает в Шиловском районе Рязанской области (рис. 4.3). По данным государственного водного реестра России, река относится к Окскому бассейновому округу. Длина реки  $L = 24$  км, площадь бассейна  $F_{бас} = 110$  км<sup>2</sup>, река Ибрёда относится к классу малых рек (длиной до 100 км и площадью до 2000 км<sup>2</sup>).

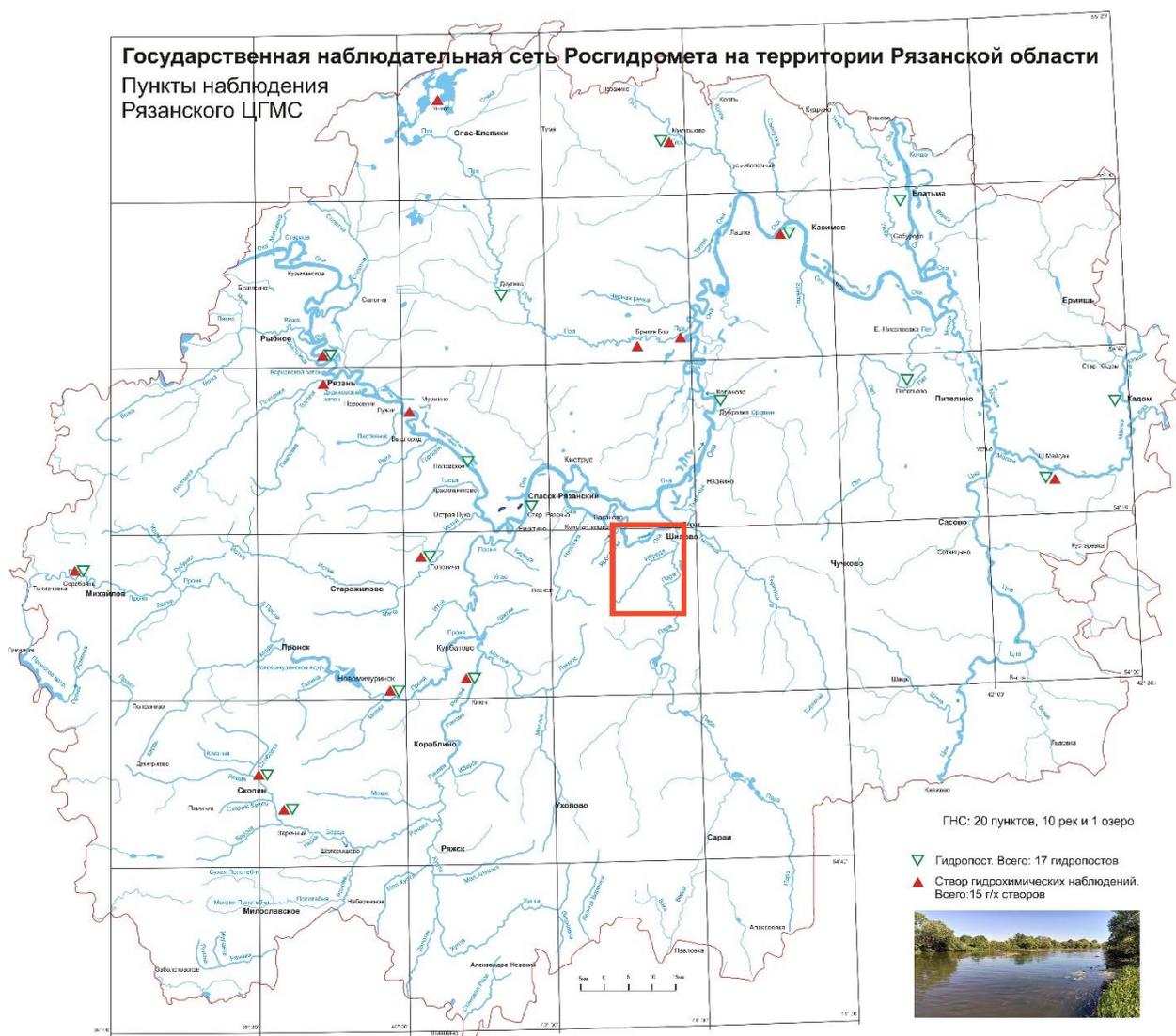


Рисунок 4.3 – Местоположение р. Ибрета на территории Рязанской области

На основе входных данных, представляющих цифровую модель рельефа земной поверхности с пространственным разрешением 90м, провести корректировку ЦМР для целей проведения гидрологического анализа, создать слои синтетической сети водотока, границ водосборной территории сети водотока и частных водосборов ее сегментов, создать таблицы атрибутивных данных при расчете гидрографических характеристик.

Последовательность шагов выполнения упражнения:

- 1) Откройте новый проект в QGIS (рис. 4.4) и добавьте в качестве базовой карты любое покрытие космических снимков, например Yandex Satellite (Яндекс спутник).

*Комментарий.* Для добавления базовой карты, в окне поиска QMS необходимо ввести название источника Yandex Satellite и, после чего нажать кнопку «Добавить», расположенную напротив его названия.

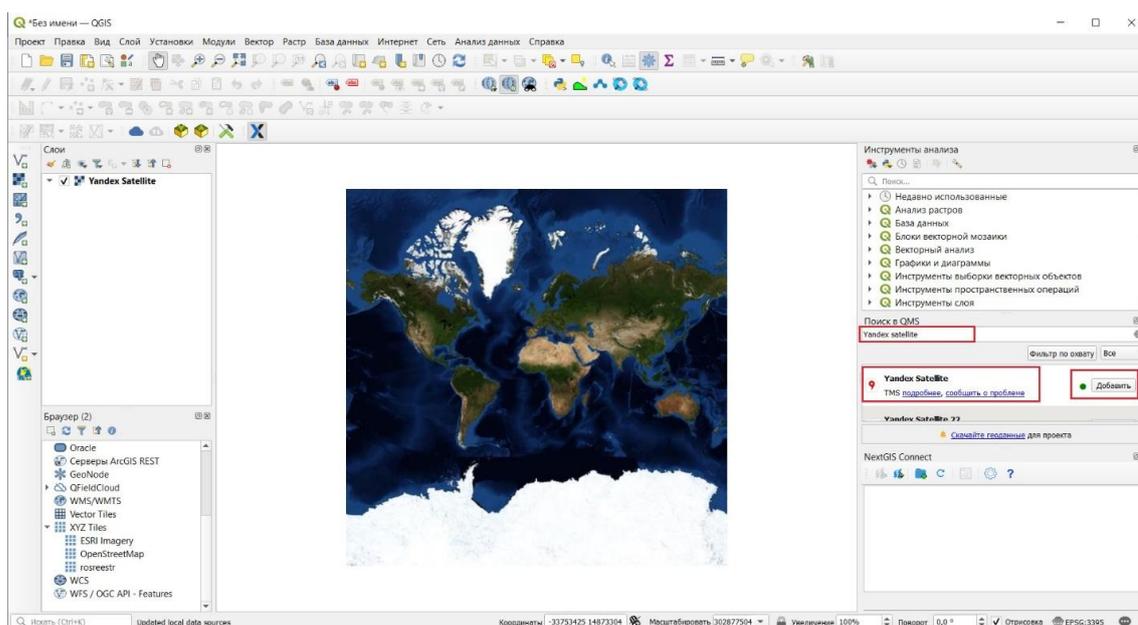


Рисунок 4.4– Открытие нового проекта в QGIS и добавление базовой карты

- 2) Добавьте в проект набор данных SRTM (dtm\_ibredac.tif) и найдите в инструментах анализа панель Terrain analysis – Hydrology (рис. 4.5).

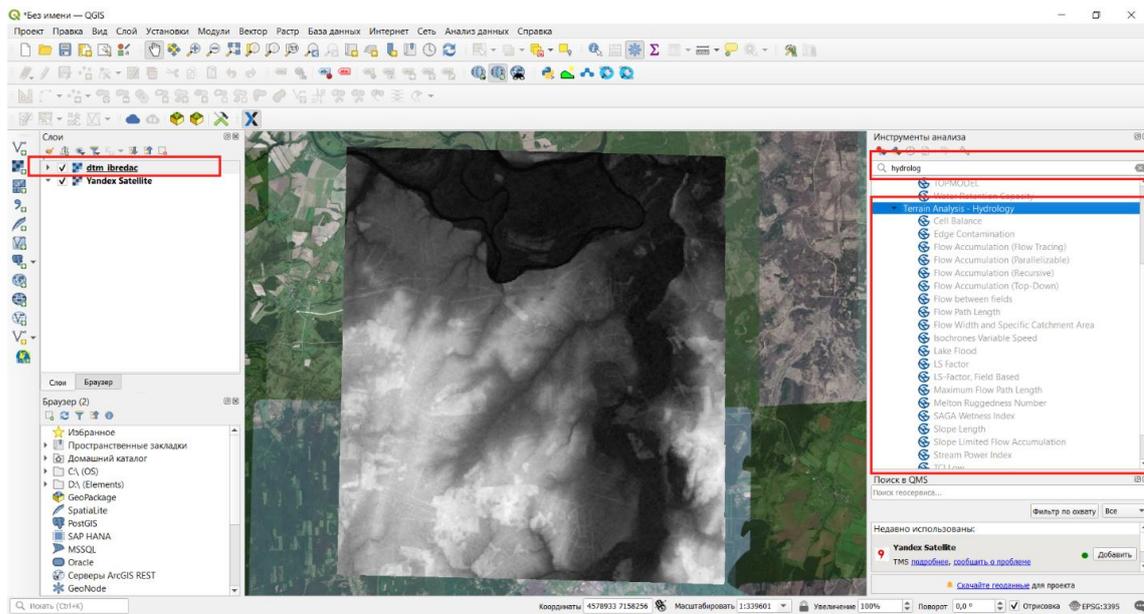


Рисунок 4.5– Добавление растровых данных ЦМР и поиск инструментов группы Terrain analysis – Hydrology

*Комментарий.* При добавлении растровых данных о рельефе они отображаются в монохромной палитре (низкие значения отметок высот отображаются темнее, высокие – более светлыми оттенками градации серого цвета).

3) На втором этапе гидрологического анализа ЦМР проведите заполнение локальных понижений на массиве геоданных.

*Комментарий.* Операции на растре, используемые при выделении водосборных территорий, основаны на гравитационном принципе движения потока воды по земной поверхности. Согласно этому принципу, вода будет следовать по пути с наибольшим градиентом (самый крутой спуск). Квадратные пиксели растровой сетки ЦМР имеют одинаковые горизонтальные размеры, а их центрам присвоены соответствующие отметки земной поверхности. Трассируя поток вниз по склону, можно связывать ячейки ЦМР в так называемые “сети потока” (drainage networks) и определять водосборные площади и границы бассейнов. Если на модели есть замкнутые локальные понижения, то они выступают как препятствие для распространения стока. Распространенной практикой является удаление замкнутые

локальные понижения с ЦМР перед началом собственно гидрологического моделирования. Удалить понижения можно путём увеличения высот внутри них — таким образом понижение либо исчезает, либо перестаёт быть замкнутым. Эта процедура реализуется с использованием итерационного процесса обработки массива геоданных инструментом *Fill Sinks XXL (Wang & Liu)*.

- 4) Выберите название слоя в таблице слоев и экспортируйте растровый файл *dtm\_ibredac.tif* в формат *Saga GIS Binary Grid* (нативный формат растровых данных SAGA).

*Инструмент Fill Sinks XXL (Wang & Liu) на входе требует нативный формат растровых данных SAGA, поэтому для работы с данным инструментом экспортировать данные в Saga GIS Binary Grid (рис. 4.6). Для этого необходимо выбрать название слое в таблице слоев и выбрать в списке «Экспорт», «Сохранить как».*

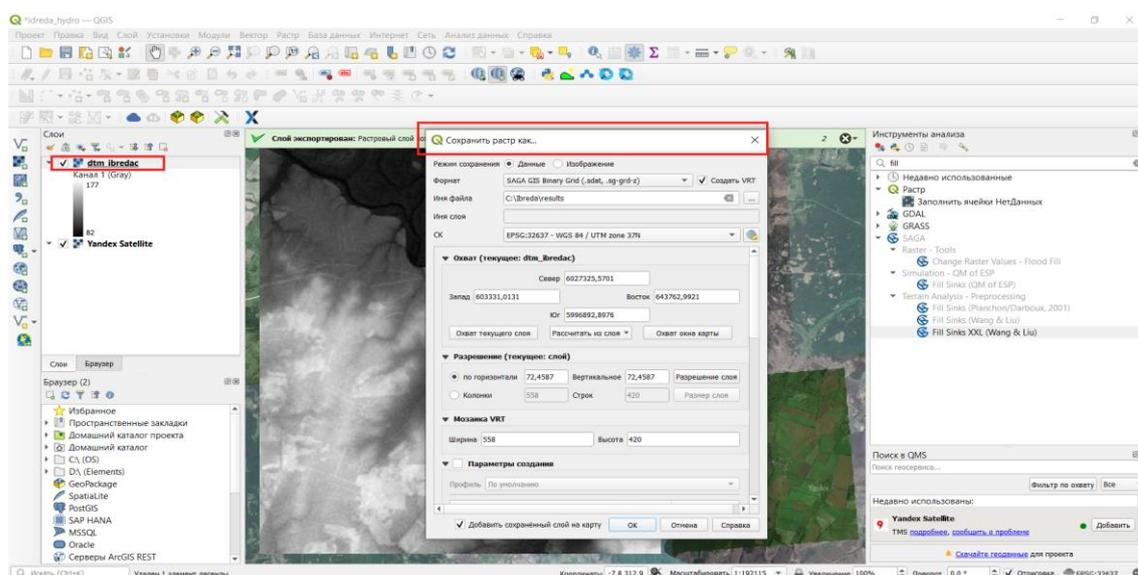


Рисунок 4.6— Экспорт растровых данных в формат Saga GIS Binary Grid

- 5) Заполните локальные понижения на массиве геоданных ЦМР водосбора.

*Комментарий. Операции на растре, используемые при выделении водосборных территорий, основаны на гравитационном принципе*

движения потока воды по земной поверхности. Согласно этому принципу, вода будет следовать по пути с наибольшим градиентом (самый крутой спуск). Квадратные пиксели растровой сетки ЦМР имеют одинаковые горизонтальные размеры, а их центрам присвоены соответствующие отметки земной поверхности. Трассируя поток вниз по склону, можно связывать ячейки ЦМР в так называемые “сети потока” (drainage networks) и определять водосборные площади и границы бассейнов. Если на модели есть замкнутые локальные понижения, то они выступают как препятствие для распространения стока. Распространенной практикой является удаление замкнутые локальные понижения с ЦМР перед дальнейшим моделированием.

Найдите инструмент Fill Sinks XXL (Wang & Liu) через поиск в панели инструментов. Этот инструмент преобразует ЦМР таким образом, что на месте замкнутых понижений будет сформирована наклонная поверхность. Угол наклона задаётся пользователем. Примените этот инструмент к набору ЦМР с углом наклона  $0,01^\circ$ . Результат сохраните в рабочую директорию под именем filled, расширение оставьте таким, какое предлагается по умолчанию (.sdat) (рис. 4.7).

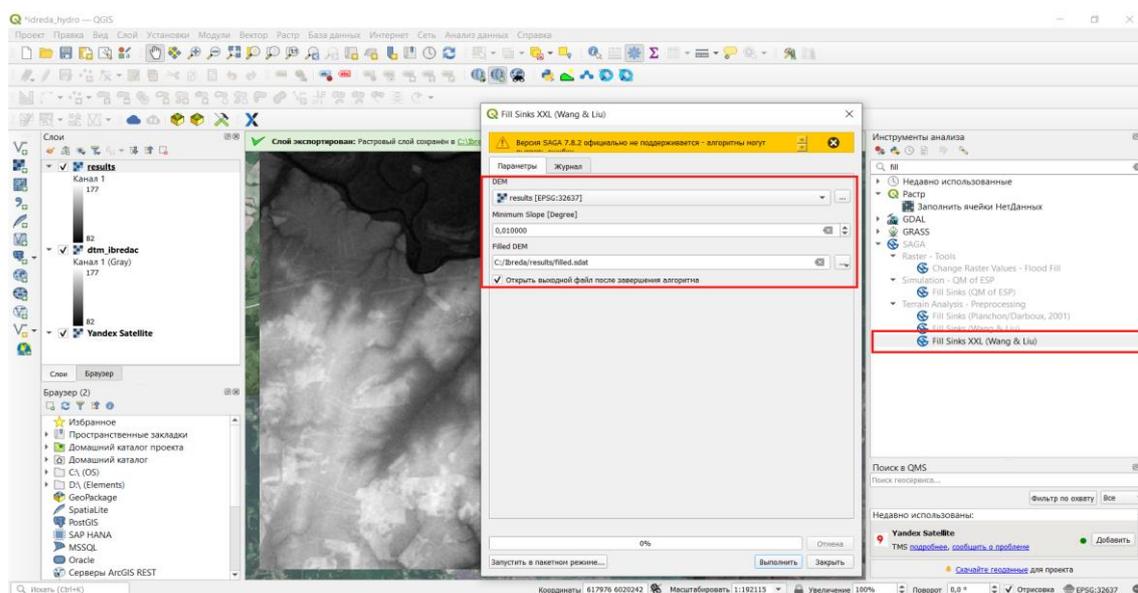


Рисунок 4.7 – Установка параметров в окне инструмента Fill Sinks XXL

б) Для того, чтобы посмотреть результат работы инструмента и оценить растровую поверхность до и после применения инструмента, используя растровый калькулятор, произведите вычитание одного исходного растра из сгенерированного (рис. 4.8).

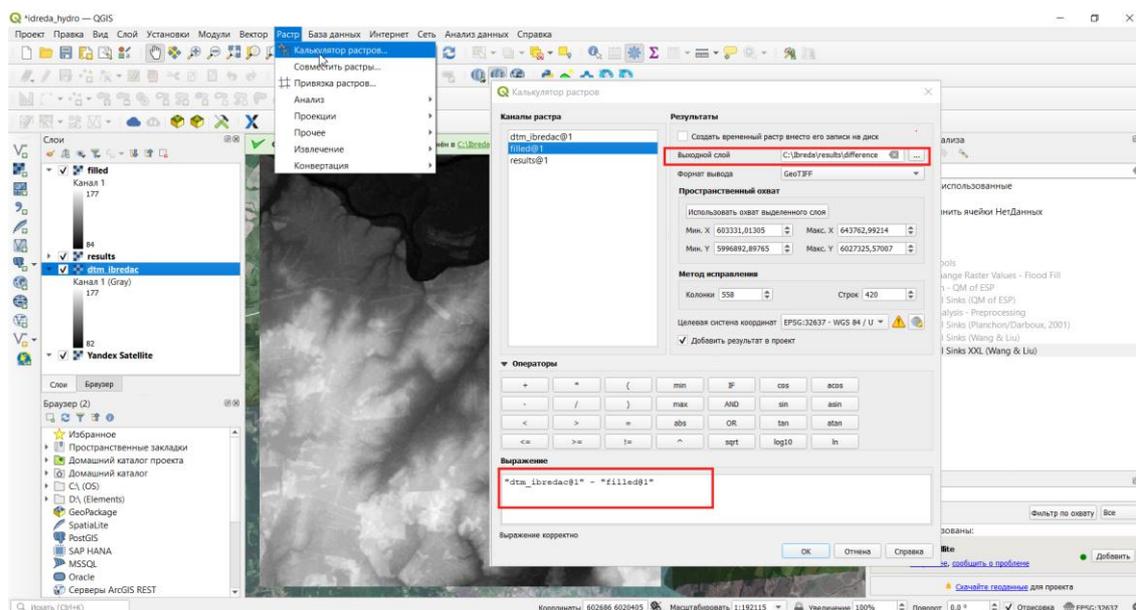


Рисунок 4.8 – Параметризация инструмента «Калькулятор растра»

*Комментарий. Отобразите полученную растровую поверхность и оцените изменения ЦМР, произошедшие после применения инструмента. Какие формы рельефа изменились наиболее сильно?*

7) Создайте слой геоданных площадей водосборов (водосборная площадь) для каждой точки растрового слоя с помощью инструмента Flow Accumulation.

*Комментарий. Водосборная площадь определяется для каждой геоточки растровой поверхности так, как если бы геоточка была замыкающим створом. В растровом анализе водосборная площадь определяется для ячеек ЦМР и равняется суммарной площади всех ячеек, сток из которых проходит через данную ячейку. Водосборную площадь вместе со всеми другими величинами, которые можно*

рассчитать по аналогичному принципу, часто называют суммарным (аккумуляционным) потоком (flow accumulation) (рис. 4.9).

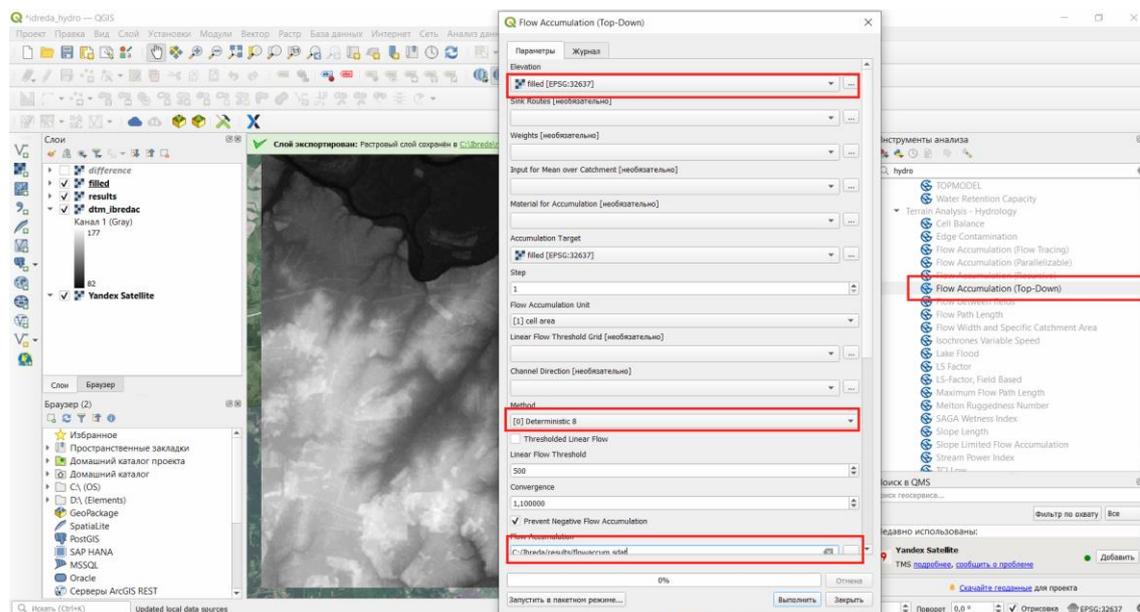


Рисунок 4.9 – Параметризация инструмента «Flow Accumulation» для вычисления водосборной площади

8) Измените отображение полученных данных для лучшей визуализации полученных данных.

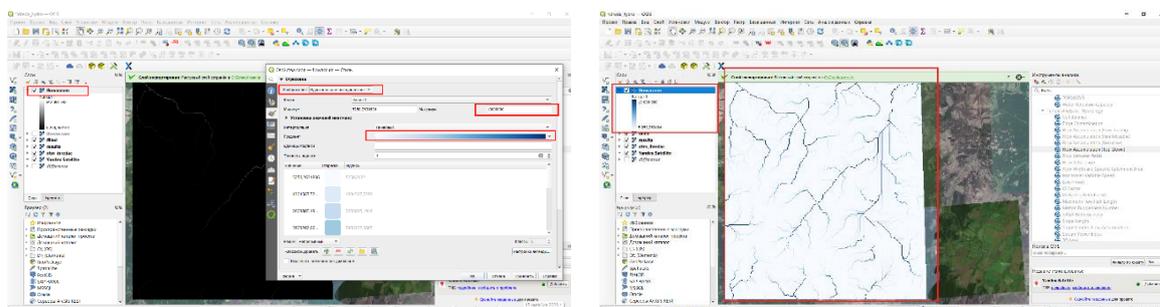


Рисунок 4.10 – Визуализация построенного слоя водосборной площади

*Комментарий.* Водосборная площадь при движении вниз по склону увеличивается экспоненциально, поэтому изображение в оттенках серого, которое вы видите, почти чёрное и выглядит неинформативным для пользователя. Измените стиль отображения раstra flowассит на «Одноканальное псевдоцветное», установите максимальное значение на  $1e+07$ , и выберите монохромную голубую шкалу. Примените изменения. (рис. 4.10б). Исследуйте полученный слой.

9) Создайте растр водотоков на основе модели водосборной территории.

*Комментарий.* Для окончания процесса формирования цифровых моделей водосборных территорий, соответствующих различным сегментам водотока необходимо установить их расположение, а также связать их с соответствующими водосборными территориями. Сначала проводятся операции по идентификации пикселей ЦМР, соответствующих участкам формирования сегментов водотоков. Для этого проводится обработка растра аккумуляции потока (рис. 4.11б.) и задание порогового числа пикселей, питающих исток постоянный водоток. Так, например, при назначении пороговой величиной равной 5, все пиксели, имеющие значения аккумуляцией поверхностного стока больше этого значения включаются в сеть водотока (рис. 4.11а). В результате обработки пикселей растра аккумуляции поверхностного стока создается новый растр сети водотока, в котором пиксели соответствующие пикселям растра аккумуляции поверхностного стока со значениями большими или равными порогу присваивают значение 1, а всем другим пикселям присваивается значение 0 (или -9999) (рис. 4.11в).

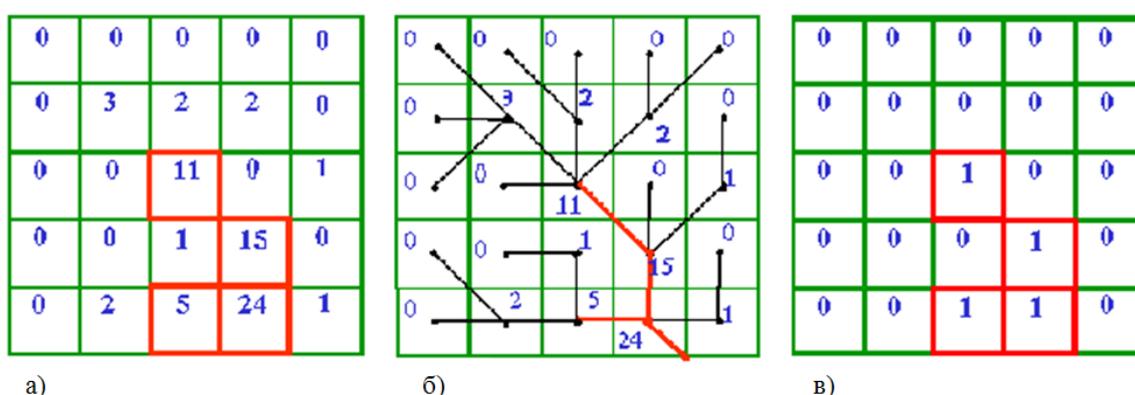


Рисунок 11 - Определение пикселей водотока по растру аккумуляции потока и значению пороговой величины: а) пиксели сети аккумуляции со значениями пороговой величины большими или равными 5 отображены

красным цветом; б) пиксели водотока, выделенные на растре поверхностного стока отображены красным цветом; в) растр водотока, где пиксели водотока отображены красным цветом.

*Комментарий.* Для определения пикселей, соответствующих заданному пороговому значению в QGIS можно воспользоваться инструментом переклассификации (Переклассификация по таблице). В данном упражнении примем, что минимальная водосборная площадь, необходимая для формирования водотока, составляет  $10^5$  ячеек и  $10^6$ .

10) Запустите инструмент «Переклассификация по таблице». Переклассифицируйте растр flowaccum таким образом, чтобы все значения, меньшие  $10^5$  ячеек и  $10^6$ , получили новое значение (-9999), а все значения, большие или равные  $10^5$  ячеек и  $10^6$  — новое значение (1). Результаты сохраните в вашу рабочую директорию под именем network и network2 соответственно, формат — tif (рис. 4.12)

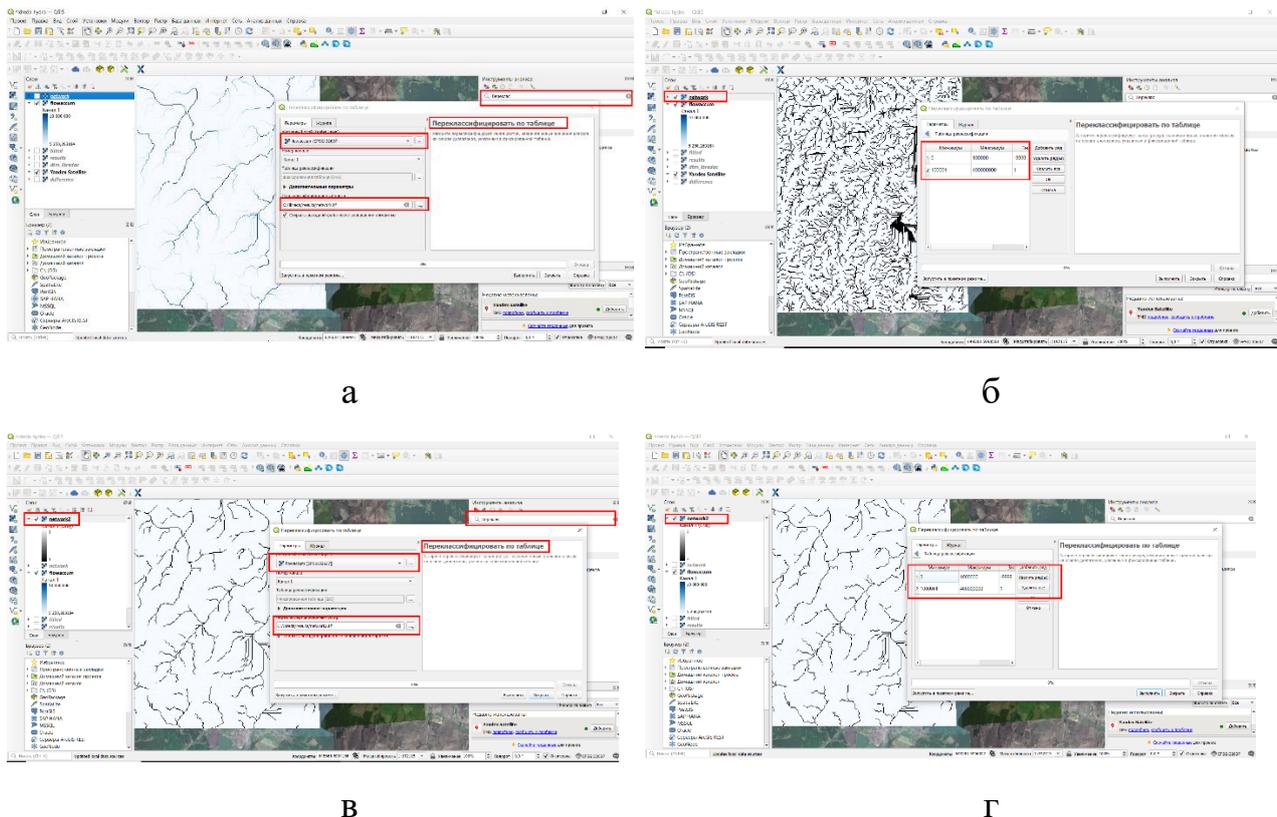


Рисунок 4.12 – Переклассификация растра по пороговому значению

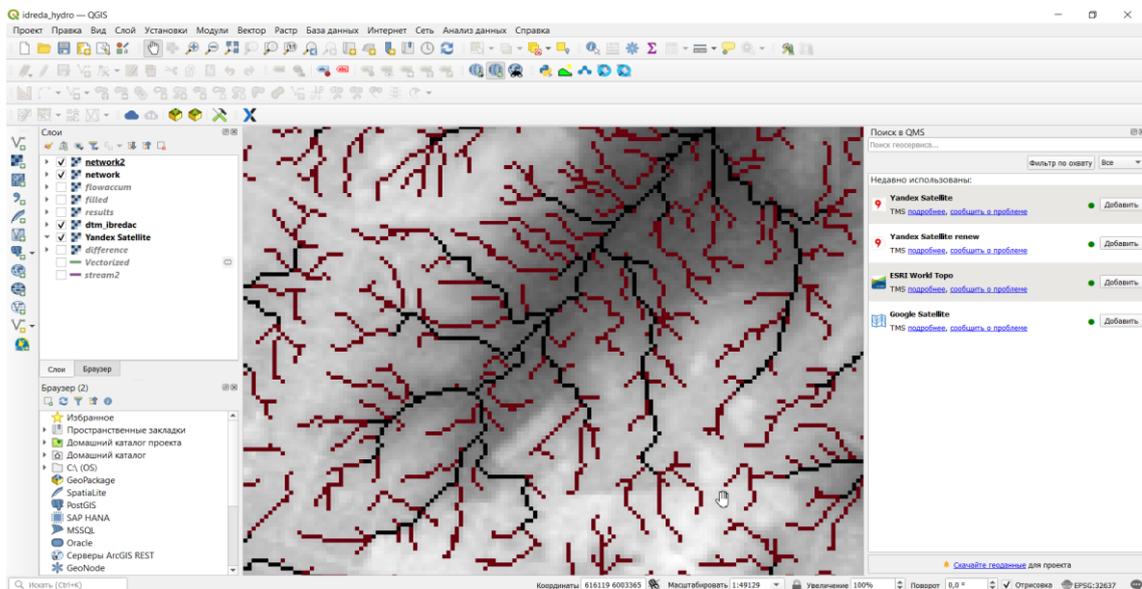


Рисунок 4.13 – Разница двух растров, в которых проводилась идентификация по двум пороговым значениям в  $10^5$  ячеек и  $10^6$

- 11) Переведите растровые данные в векторные для того, чтобы сформировать синтетическую сеть водотоков в векторной модели данных. Для этого воспользуйтесь инструментом GRASS (r.to.vect) (рис. 4.13) и отобразите полученные данные в проекте (рис. 4.14).

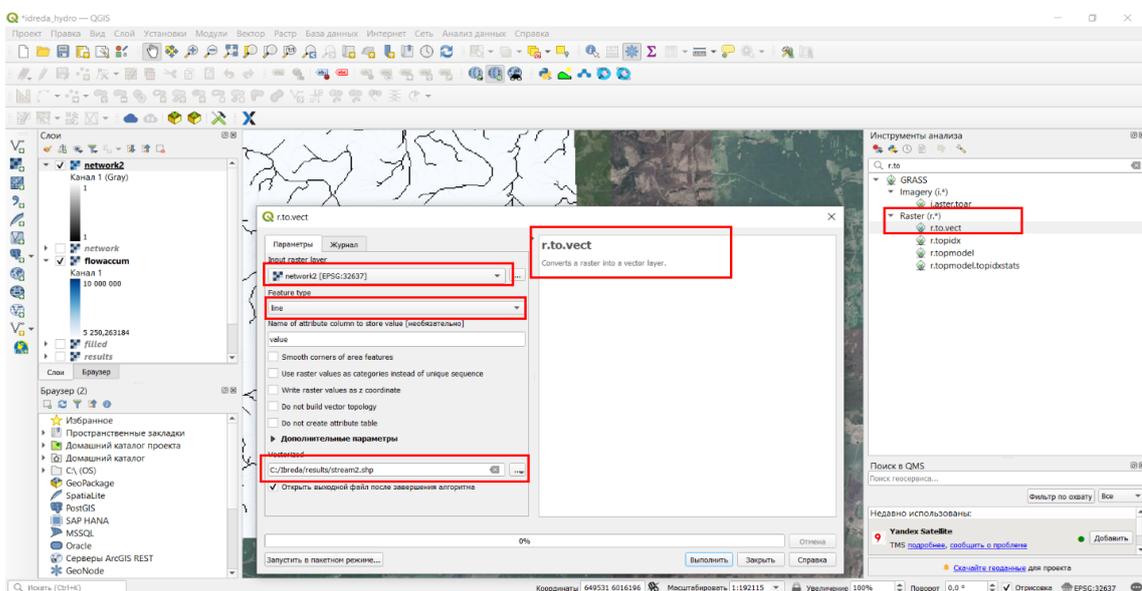


Рисунок 4.13– Инструмент GRASS (r.to.vect) для трансформации растровых данных в векторные

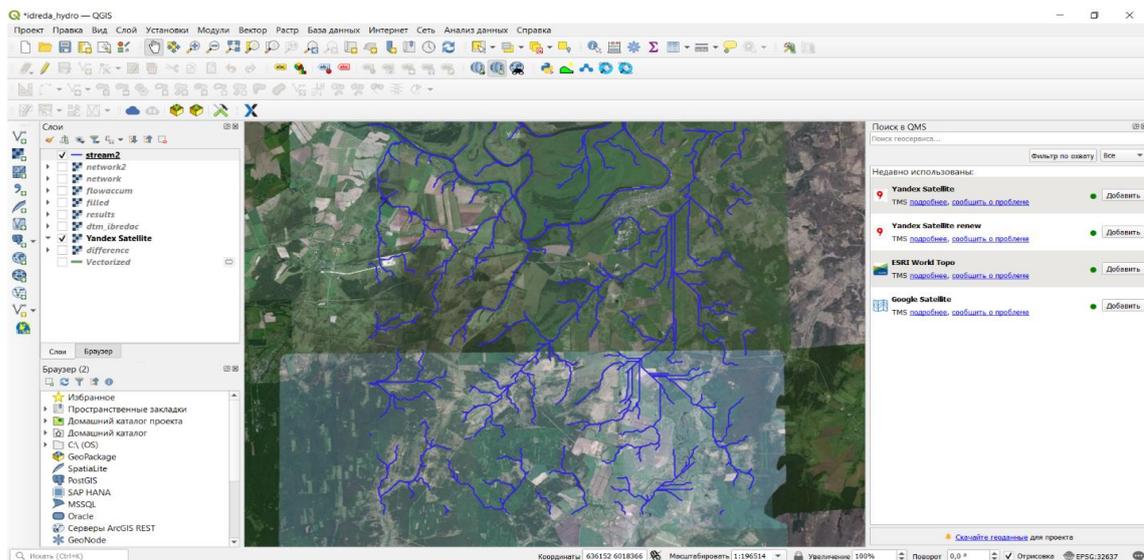


Рисунок 4.14– Векторизованная синтетическая сеть водотоков

12) Найдите инструмент Upslope Area из группы SAGA, который используется предназначен для идентификации всех ячеек, сток из которых проходит через точку с заданными координатами — и определяет границы водосборного бассейна;

*Комментарий.* Для данного инструмента необходимо указать геоточку устья водосбора (файл *outlet.shp*). Откройте атрибутивную таблицу файла и скопируйте координаты в поля X, Y инструмента (рис. 4.15).

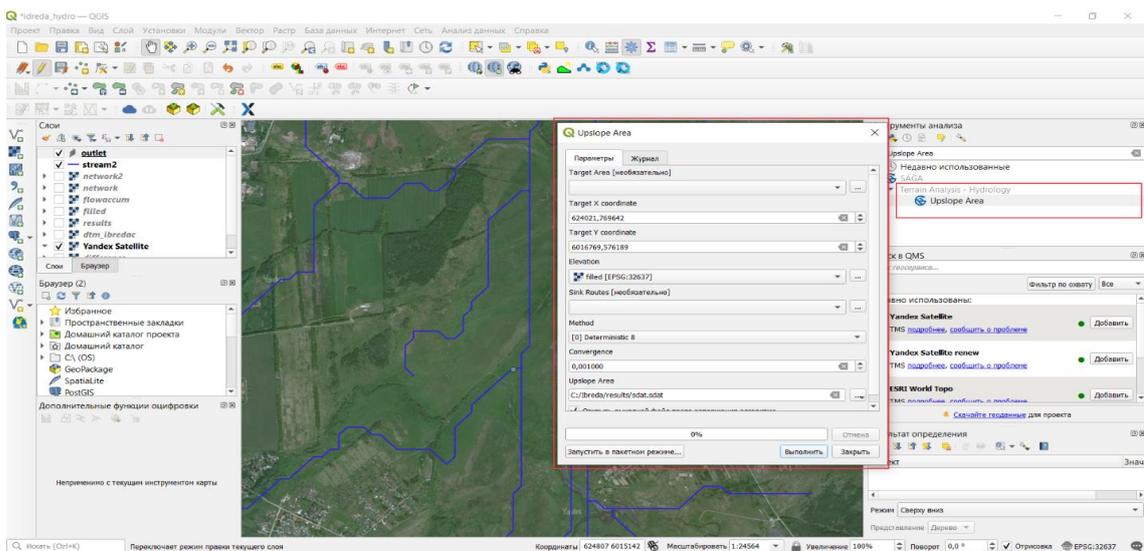


Рисунок 4.15 – Проект с добавленными слоями сгенерированных рандомных геоточек с извлеченными значениями раstra

*Комментарий. Проанализируйте данные (какое количество геоточек сгенерировано в каждом из слоев, диапазон значений). Для этого нажмите правой кнопкой мыши на название слоя в таблице слоев и выберите «Открыть таблицу атрибутов» (рис. N.16). Запустите инструмент. Результат векторизуйте с помощью инструмента GRASS (r.to.vect). Добавьте результат в ваш проект для отображения (рис. 4.16). Таким же образом можно внутри бассейна создать и подбассейны для разных устьевых геоточек синтетической сети.*

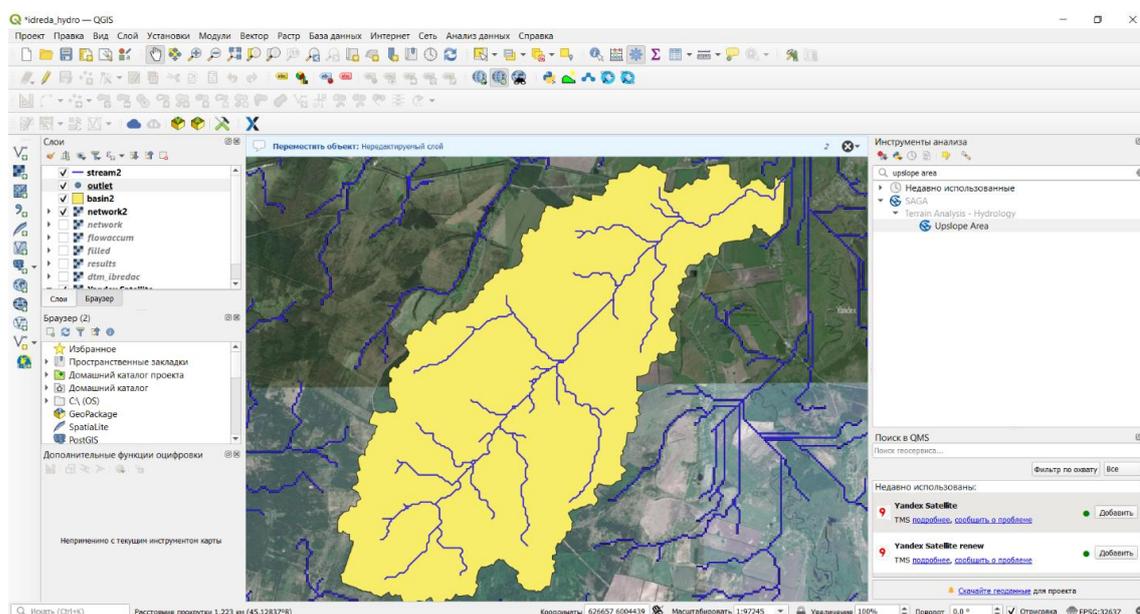


Рисунок 4.16– Окно проекта с добавленными бассейном, устьевой точкой и синтетической речной сетью

- 13) Отобразите результаты в 3d виде. Для этого используйте дополнительный модуль Qgis2threejs. Модуль предназначен для создания трёхмерных визуализаций в QGIS на основе растровых и векторных слоев данных. Установите данный модуль.
- 14) Для дополнительного эффекта немного поработайте со слоями. Вырежьте из слоя с заполненными понижениями с помощью границ водосбора р. Ибреда экстенд ЦМР по границам водосбора. Для этого используйте инструмент «Кадрировать растр по маске» (рис. 4.17).

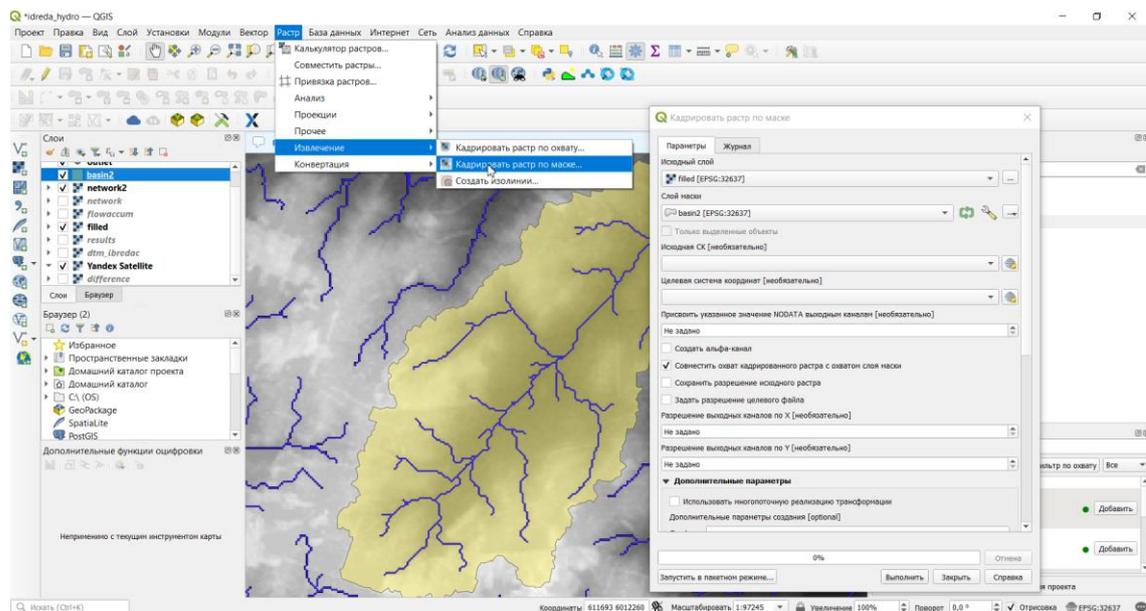


Рисунок 4.17– Окно инструмента «Кадрировать растр по маске»

- 15) Измените настройки визуализации слоя ЦМР в границах бассейна, следующим на стиль - одноканальное псевдоцветное, выберите понравившуюся вам цветовую палитру (рис. 4.18).

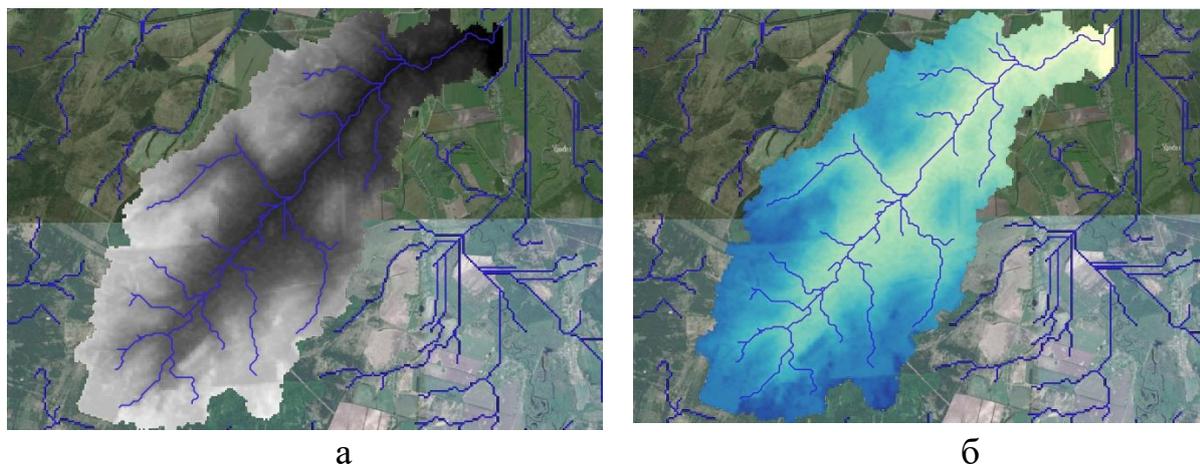


Рисунок 4.18– Изменение визуального представления слоя, отображающего ЦМР в границах бассейна

- 16) Для создания 3D-визуализации нажмите на пиктограмму Qgis2threejs (рис. 4.19). В окне модуля Qgis2threejs включите слой dem\_basin, fill. Высоты из этих слоев будут использоваться для создания 3D-поверхности, а текстура (материал) изображения будет составлена на основе изображения в основном окне карты.

*Комментарий. Изображение в окне Qgis2threejs выглядит плоским. Для того, чтобы сделать его более «объёмным», можно увеличить вертикальный масштаб слоя ЦМР в границах бассейна. Для этого зайдите в настройки сцены (Scene – Scene settings...) и установите коэффициент вертикального масштабирования (Z exaggeration) равным 20. Вращая (с помощью зажатой левой кнопки мыши), перемещая (правой кнопкой мыши) и масштабируя (колесо мыши) изображение в окне Qgis2threejs, подберите такой ракурс изображения, который позволит наиболее наглядно, на ваш взгляд, продемонстрировать рельеф местности.*

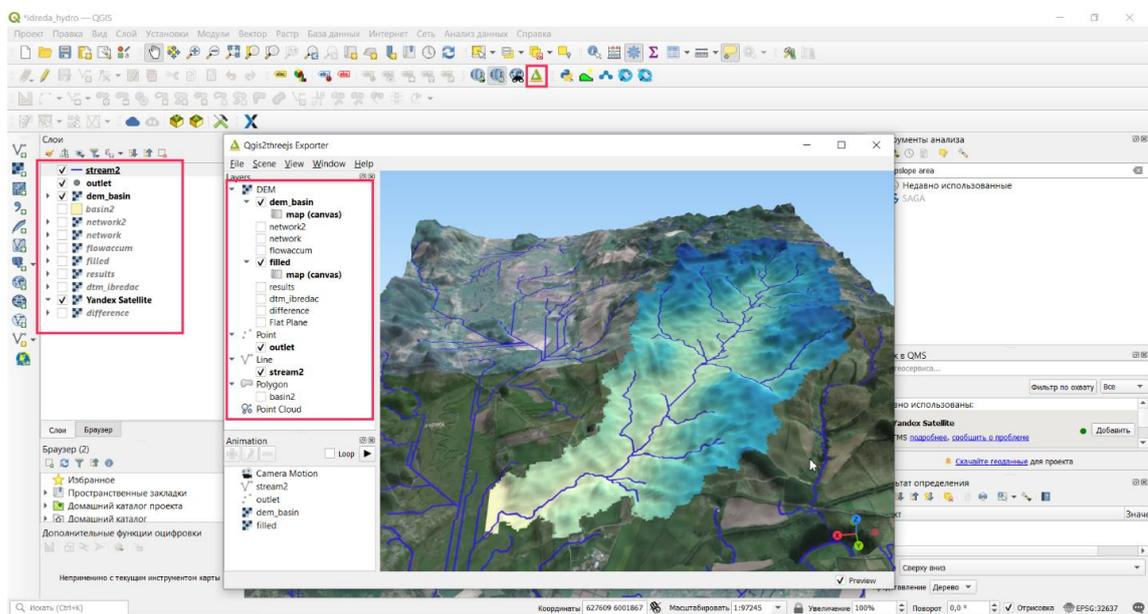


Рисунок 4.19 – 3D-визуализация в модуле Qgis2threejs

17) Экпортируйте полученное изображение (File – Save Scene As – Image (\*.png) ...).

Задание к упражнению:

1. Составить таблицу, в которой будут представлены длина всех водотоков, лежащих в пределах границы бассейна р.Ибрета и площадь бассейна.

2. Построить поперечный профиль речной долины вблизи геоточки А с координатами (54°14'24.9"N 40°48'05.0"E), используя инструмент построения профиля для исследования растровых поверхностей.
3. Создать 3D-визуализацию рельефа изучаемой территории бассейна р. Ибрета.

### **Контрольные вопросы к упражнению:**

1. Что такое цифровая модель рельефа?
2. Чем отличается цифровая модель местности от цифровой модели рельефа?
3. Для чего в данном упражнении использовался инструмент Переклассификация по таблице?
4. Назовите источник данных для представленной в упражнении ЦМР? Какое разрешение у растровой ЦМР, использованной Вами в данном упражнении?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ пространственного варьирования влажности почвенного покрова вдоль фронта дождевальнoй машины / А. М. Зейлигер, С. В. Затицацкий, О. С. Ермолаева, Д. А. Колганов // Природообустройство. – 2023. – № 3. – С. 15-22.
2. ДеМерс, Майкл Н. Географические информационные системы. Основы. Пер. с англ. Дата+. Москва, 1999. 507 с.
3. Греченева, А. В. Машинное обучение. Практикум для студентов аграрных ВУЗов : Учебно-методическое пособие для студентов направления подготовки 09.03.03 Прикладная информатика / А. В. Греченева, О. С. Ермолаева. – Санкт-Петербург : Издательство «Научно-технологические технологии», 2023. – 32 с.
4. Ермолаева, О. С. Классификация и зонирование потоков суммарного испарения за вегетацию для территории Марковского района Саратовской области, полученных по данным продукта MOD 16 ET в 2003-2017 гг / О. С. Ермолаева, А. М. Зейлигер // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 4. – С. 83-88.
5. Зейлигер, А.М. Геоинформационная оценка гидрографических характеристик речной сети и ее водосборной территории с использованием цифровой модели рельефа в ArcGIS10.x [Текст]: учеб. пособие / А.М. Зейлигер, О.С. Ермолаева. - М.: Триада, 2016. - 62 с.
6. Зейлигер, А.М. Применение геоинформационных систем для решения прикладных задач мониторинга и управления: учебное пособие / А. М. Зейлигер, О. С. Ермолаева; Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева (Москва). — Электрон. текстовые дан. — Москва, 2018. — 154 с. — Коллекция: Учебная и учебно-методическая литература. — Режим доступа :

- <http://elib.timacad.ru/dl/local/umo362.pdf>. - Загл. с титул. экрана. - Электрон. версия печ. публикации.
7. Зейлигер, Анатолий Михайлович. Цифровые методы обработки данных дистанционного зондирования земли: учебное пособие / А. М. Зейлигер, О. С. Ермолаева; Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева (Москва). — Электрон. текстовые дан. — Москва, 2018. — 129 с. — Коллекция: Учебная и учебно-методическая литература. — Режим доступа : <http://elib.timacad.ru/dl/local/umo369.pdf>. - Загл. с титул. экрана. - Электрон. версия печ. публикации.
  8. Интерполяция точечных данных – QGIS Tutorials and Tips [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.qgistutorials.com/ru/docs/interpolating\\_point\\_data.html](https://www.qgistutorials.com/ru/docs/interpolating_point_data.html) (дата обращения: 18.06.2023)
  9. Лурье И.К., Самсонов Т.Е. Основы геоинформатики // Информатика с основами геоинформатики. Часть 2: Основы геоинформатики. Учебное пособие. – М.: Географический факультет МГУ, 2016. – 200 с.
  10. Управление сельхозпредприятием с использованием космических средств навигации (ГЛОНАСС) и дистанционного зондирования Земли / Е. Ф. Шульга, А. О. Куприянов, В. К. Хлюстов [и др.]. – Москва : Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. – 286 с.
  11. Цифровая трансформация агропромышленного комплекса / Т. И. Ашмарина, Т. В. Бирюкова, В. Т. Водяников [и др.]. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2022. – 160 с.
  12. Гидромелиорация земель и водное хозяйство / Х. А. Абдулмажидов, Н. А. Александров, М. С. Али [и др.]. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2022. – 358 с.

*Учебное издание*

**Ермолаева Ольга Сергеевна  
Зейлигер Анатолий Михайлович  
Греченева Анастасия Владимировна**

**РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ АПК. АНАЛИЗ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ  
НАБОРОВ ДАННЫХ**

Учебное пособие

Издательство РГАУ-МСХА