

Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И.Сатпаева

УДК 528.02:622.83

На правах рукописи

РАХИМБАЕВА ДИНАРА ЖЕКСЕНГАЛИЕВНА

**Совершенствование методики мониторинга изменения
береговой линии Каспийского моря на основе данных
дистанционного зондирования земли**

6D071100 - Геодезия
Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант:
кандидат технических наук,
Мейрамбек Г.
Зарубежный научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Левин Е.

Республика Казахстан
Алматы, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

ВВЕДЕНИЕ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ БЕРЕГОВЫХ ЛИНИЙ

1.1 Анализ береговой линии Каспийского моря

1.2 Современные проблемы водных объектов РК

1.3 Обзор современных исследований изменения береговой линии и дна водных объектов в странах Дальнего и Ближнего Зарубежья

1.4 Опыт применения данных дистанционного зондирования в Республики Казахстан

1.5 Современные подходы изучения береговой линии Каспийского моря

1.6 Выводы по главе

2 КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАЗЕМНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

2.1 Инструментальные наблюдения

2.2 Дистанционное зондирование Земли

2.2.1 Обзор программного обеспечения для обработки данных ДЗЗ

2.2.2 Характеристика космических снимков, полученных со спутника Landsat 8

2.2.3 Мониторинг береговой линии Казахстанского побережье по данным космических снимков

2.4 Результаты полученной обработки, оценка точности

2.5 Анализ результатов с наземными инструментальными наблюдениями

2.6 Выводы по главе

3 ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

3.1 Обзор методов искусственного интеллекта для анализа изменений береговой линии

3.2 Применение ИИ для анализа изменений береговой линии Каспийского моря

3.3 Сравнительный анализ экономических затрат использования ИИ и традиционных методов

3.4 Методология обработки данных GEE

Выводы по главе 3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие документы и стандарты:

Правила присуждения ученых степеней, утвержденных приказом МОН РК от 31 марта 2011 года №127.

2 Государственный общеобязательный стандарт образования Республики Казахстан послевузовское образование. Докторантура. ГОСО РК 5.04.034 – 2011.

3 Правила присуждения ученых степеней от 31 марта 2011 года №127; межгосударственные стандарты: ГОСТ 7.32-2001 (изменения от 2006 г.). Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

4. Приказ Министерства экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан №54 от 25 марта 2020 года "Об утверждении Правил использования данных дистанционного зондирования Земли в экологическом мониторинге".

5. Приказ Министерства экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан №6 от 15 января 2021 года "Об утверждении Правил проведения экологического мониторинга".

СОКРАЩЕНИЕ И ОБОЗНАЧЕНИЕ

В данной диссертации, в соответствии с ее целями и задачами, используются следующие основные понятия и сокращения:

ДЗЗ – дистанционного зондирования Земли
КА – космический аппарат
GMES – Global Monitoring for Environment and Security
ШМСА–ВР – широкозахватный мультиспектральный съемочный комплекс высокого разрешения.

ШМСА–СР – широкозахватный мультиспектральный съемочный комплекс среднего разрешения.

ОАО – объединенное акционерное общество
НКЦ – Национальный космический центр
НК «КГС» – национальная компания «Казахстан Гарыш Сапары»
ДС – дифференциальных станций
РНКУ – резервный наземный комплекс управления
ИСЗ – искусственного спутника Земли
ЦМР – цифровая модель рельефа
SRTM – Shuttle Radar Topographie Mission
BMM – виртуальных моделей местности
DEM – Digital Elevation Model
TIN – Triangulated Irregular Network
RPC – Rational Polynomial Coefficient
GSD – Ground Sample Distance
ESRI – Environmental Systems Research Institute
ГГС – Государственной геодезической сети
ГИС – Географическая информационная система
СТ РК – Государственный стандарт Республики Казахстан
КМ – Каспийское море
GPS – Глобальная система позиционирования (Global Positioning System)

NASA – Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration)

GEE – Google Earth Engine (Гугл Земля)

NDVI – Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index)

ВВЕДЕНИЕ

Две трети части земной поверхности покрыты водой, и более половины человечества сосредоточено в полосе шириной 50 миль вдоль побережья. Человечество тесно связано с обширными акваториями, а здоровье и качество жизнедеятельности в наших океанах напрямую оказывают влияние на здоровье нашей жизни.

Регион Каспийского моря уникален по природным особенностям. Бассейн Каспия - одна из крупнейших бессточных областей планеты, расположен в различных ландшафтных зонах, обладает редкими запасами рыб осетровых видов и ценным эндемичным биоразнообразием. Каспий активно используется как для эксплуатации биоресурсов, так и для разработки месторождений углеводородов. Каспийское море является высокопродуктивным водоемом, что сочетается с относительной бедностью его биологического разнообразия. Фауна Каспийского моря примерно в 2,5 раза беднее в сравнении с Черным морем и в 5 раз беднее, чем в Баренцевом море. [1, 126-131]

За последние 3 десятилетия уровень вод Каспийского моря продолжает расти большими темпами, что может привести к затоплению пространства суши пяти прикаспийских государств. Казахская часть территории каспийского региона занимает особое место по экологическому бедствию, формирующемуся под влиянием природных и антропогенных факторов, важнейшими из которых является подъем уровня воды в море и бурное развитие нефтегазового комплекса [2].

В связи с этим согласно Инструкции создаются карты:

- изучение и оценка района акватории;
- обеспечение геолого-съёмочных, поисковых и геофизических работ, подготовки участков для поискового бурения и прогнозной оценки на твердые полезные ископаемые;
- планирование работ по освоению береговой зоны;
- проектирование водопользования и водоохранных мероприятий;
- разработка схем модернизации технического состояния и благоустройства крупных водоемов.

В соответствии с пунктом 7 статьи 4, Закона Республики Казахстан от 3 июля 2002 года, № 32-ІІ «О геодезии и картографии» основными направлениями геодезической и картографической деятельности наряду с созданием, обновлением и изданием топографических карт планов суши является картографирование шельфа морей, озер, рек, водохранилищ и создание топографических, морских навигационных карт, пособий, лоций морей, судоходных рек и водоемов.

Актуальность проблемы. Масштабное, неконтролируемое и возрастающее загрязнение моря и прилегающей суши оказывает губительное воздействие на биоразнообразие и ведет к исчезновению некоторых видов флоры и фауны. Интенсивные и частые пожары лесной, кустарниковой и тростниковой растительности в дельте реки Волги в весеннее и осеннее время года также очень негативно отражается на биоразнообразии северной

части Каспия и территории районов. Под влиянием только этих двух факторов уникальные и крайне уязвимые флора и фауна находятся в стрессовой ситуации, а некоторые виды оказались под угрозой исчезновения. Мониторинг с МКС является актуальным, так как позволит сократить негативное воздействие на природную среду Прикаспийского региона. Его суть заключается в получении и анализе космической информации об общем экологическом состоянии Прикаспийского региона и выявлении источников загрязнения с предоставлением оперативной космической информации заинтересованным организациям.

В районах нефтедобычи в Казахстане на северо-восточном побережье Каспия в результате сброса попутных высокоминерализованных подземных вод (извлекаемых при нефтедобыче), а также разливов нефти образовались специфические озера. Они представляют собой страшную угрозу для экосистем Каспия, поскольку при ветровых нагонах Каспийских вод и, особенно, в случае дальнейшего повышения уровня моря произойдет катастрофическое загрязнение моря [3, 63-67].

Переход от традиционных методов на современные технологии с использованием методов и средств космической геодезии привел к развитию и широкому применению глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Наряду с этим, в последнее время на первый план выдвигаются задачи контроля природной среды и прогнозирования возможных разновременных изменений в природной обстановке различных регионов. Этим объясняется особое внимание к изучению динамики геосистем, процессов, происходящих в земной коре и создания динамических карт природных явлений.

Актуальность темы исследование колебания уровня Каспийского моря является актуальной проблемой. Казахстанская часть территории Каспийского региона занимает особое место по экологическому бедствию, формирующемуся под влиянием природных и антропогенных факторов, важнейшими из которых является изменение уровня воды в море и бурное развитие нефтегазового комплекса.

Целью работы совершенствование методики мониторинга изменения береговой линии Каспийского моря с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), обеспечивающую высокую точность, оперативность и информативность для анализа динамики береговой зоны и принятия управленческих решений.

Задачи исследования

- Провести обзор и анализ современных подходов к мониторингу береговой линии, включая использование спутниковых данных, геоинформационных систем (ГИС) и моделей изменения береговой зоны.
- Выбрать наиболее подходящие спутниковые платформы и сенсоры для мониторинга береговой линии Каспийского моря, оценить их разрешение, периодичность и спектральные характеристики.
- Создать алгоритмы обработки спутниковых данных, включая автоматическую классификацию, детекцию изменений и интеграцию многовременных данных.

– Создать усовершенствованную методику мониторинга береговой линии Каспийского моря, основанная на использовании современных данных дистанционного зондирования Земли.

Методы исследований включали в себя: анализ существующих отечественных и зарубежных методов мониторинга водных объектов; обоснование выбора научно-обоснованных методик выполнения измерений с применением аппаратуры спутниковых систем, космических данных; разработка рабочих программ проведения экспериментов и их математическая обработка с привлечением методов математической статистики, теории вероятностей и соответствующего программного обеспечения.

Предмет исследования - территория побережья Каспия, расположенного в Атырауской и Мангыстауской области.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Интегрирован комплексный подход мониторинга береговой линии Каспийского моря, основанный на использовании данных традиционного метода, современных данных дистанционного зондирования Земли.

2. Совершенствованы алгоритмы автоматической классификации и анализа спутниковых снимков, позволяющие эффективно выявлять изменения береговой линии, вызванные антропогенными и природными факторами.

3. Предложена система долгосрочного мониторинга изменений береговой линии с использованием методов машинного обучения и анализа временных рядов данных дистанционного зондирования.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Методика мониторинга береговой линии на основе интеграции данных традиционного метода, дистанционного зондирования и геоинформационных технологий, что позволяет оперативно выявлять изменения береговой линии и анализировать их с высокой степенью точности.

2. Алгоритм обработки данных ДЗЗ для классификации объектов береговой линий, выделения зон изменений и автоматизированного сравнения временных серий геопространственных данных, повышающий точность идентификации изменений береговой линии и снижение затраты времени на анализ данных.

3. Усовершенствованная методика автоматизированной обработки спутниковых данных и машинного обучения с анализом временных рядов, обеспечивающая сравнение изменений в многовременных данных, оценку скорости и направлений изменений береговой зоны.

Практическое значение

1. Разработанная методика позволяет оперативно и с высокой точностью выявлять изменения береговой линии, обеспечивая доступ к

актуальной информации для органов управления, экологических служб и научных организаций.

2. Полученные результаты могут быть использованы для оценки воздействия природных и антропогенных факторов на прибрежные территории, а также для разработки мер по минимизации экологических рисков.

3. Полученные данные о динамике береговой линии могут быть использованы для обоснования стратегий адаптации прибрежных сообществ и инфраструктуры к изменениям уровня моря и другим климатическим вызовам.

4. Применение современных технологий обработки данных дистанционного зондирования, включая использование спутниковых данных и геоинформационных систем (ГИС), позволяет принимать оперативное решение при мониторинге исследуемых объектов.

Обоснованность и достоверность научных положений, в выводах и рекомендации основывается, на корректном использовании принципов картографирования, автоматизированной обработки данных, на кафедре «Геодезия и Картография» в Международной образовательной корпорации КазГАСА.

Реализация результатов работы. Результаты исследований положены в основу нормативно-технического документа: «Методические рекомендации по внедрению в производство приборов нового поколения и ГИС-технологий». Результаты работы также используются в учебном процессе КазНТУ им.К.И.Сатпаева, КазГАСА при чтении специальных курсов и проведении НИРС и магистрантов.

Публикации и апробация

По материалам диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ включая:

- Одну статью в рейтинговом журнале National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of geology and technical sciences (база Scopus Q3)

- Три статьи в изданиях, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки Республики Казахстан (МНВО РК)

- Три статьи в сборниках международных конференций, форумов и конгрессов.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс, что подтверждается соответствующими актами.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, приложений и содержит 100 стр., 55 рисунков, 14 таблиц, списка использованных источников из 100 наименований.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ БЕРЕГОВЫХ ЛИНИЙ

Анализ береговой линии Каспийского моря

Каспийское море является крупным бессточным озером земного шара. Основная причина, по которой Каспий все-таки считается морем, заключается в том, что его ложе состоит из земной коры океанического типа. Сформировался примерно 10 миллионов лет назад, когда закрытое Сарматское море, потерявшее связь с мировым океаном примерно 70 миллионов лет назад, разделилось на две части — Каспийское море и Чёрное море. [4, 167-171].

По одной из гипотез Каспийское море получило своё название в честь древних племен коневодов — каспиев, живших до нашей эры на юго-западном побережье Каспийского моря. За всю историю своего существования Каспийское море имело около 70 наименований у разных племён и народов.

Каспийское море расположено на стыке двух частей Евразийского континента — Европы и Азии. Каспийское море по форме похоже на латинскую букву S, изображено на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Местоположение Каспийского моря

Уникальный природный водоем планеты - Каспийское море, занимает крупную и глубокую материковую депрессию в пределах самой обширной в Евразии области внутреннего стока. Казахстанская часть Прикаспия относится к северо-восточному побережью моря и захватывает юго-восточную часть Прикаспийской низменности. Геоморфологический облик местности определяется поверхностями Хвалынской, Новокаспийской и современных аккумулятивных морских террас. Современная терраса включает в себя территорию, освободившуюся от акватории Каспия в 30-х годах и находящуюся в пределах отметок от минус 25.00 м. до минус 27.00 м. На приморской части низменности развитие почвенного и растительного покрова не завершено.

Одной из уникальных особенностей Каспия является непостоянство его уровня, объясняемое большинством исследований изменениями климатических условий, на которые в последнее время накладываются факторы человеческой деятельности. Соответственно и разработка прогнозов уровня моря базируется на климатических (гелиофизических) и вероятностно-статистических методах, исходящих из стационарности процессов, и даются путем экстраполяции составляющих водного баланса моря, а последние весьма изменчивы, причем сами эти изменения неоднородны и разнопериодичны. [5, 92-96]

Каспийское море располагается на границе Европы и Азии. Общая площадь водоема составляет 371 тыс. км², длина береговой линии – 7 000 км, максимальная глубина - 1025 м. Воды Каспия омывают берега пяти государств – Казахстана, России, Туркмении, Ирана и Азербайджана. В таблице 1.2. показана протяженность береговой линии прикаспийских стран. Протяженность Казахстанского сектора береговой линии Каспийского моря составляет 2340 км. [6].

Таблица 1.1

Длины береговых линий прикаспийских стран

№	Страна	Длина береговой линии, км
1	Российская Федерация	1695
2	Республика Казахстан	2320
3	Туркменистан	1200
4	Иран	724

История Каспийского моря – это история поднятий и опусканий его уровня. За последние 100 тыс. лет максимальный уровень поднятия Каспия зафиксирован на отметке нулевой горизонтали. Размах колебания уровня моря превышал 50 м. За последние 10 тыс. лет уровень Каспия колебался от - 36 до -20 м, т. е. размах составил около 16 м, за последние 100 лет – от - 25 до - 29 м. Основная причина этих колебаний – климатическая: изменение

маршрутов движения циклонов, определяющих количество воды в Волге и испаряемость с поверхности мелководий Северного Каспия.

Казахстанское побережье Прикаспийской низменности является труднодоступным районом: для морского транспорта этот район мелководен, со стороны суши также труднопроходим, так как прибрежные участки во многих местах покрыты вязким илом и озерно-лагунными образованиями вдоль береговой черты. Из-за постоянной миграции уровня моря на низменном казахстанском побережье весьма затруднительно установить традиционные береговые гидрометеостанции, в связи с чем использование методов дистанционного зондирования поможет разрешить часть возникающих проблем.

Море солёное, солёность вод в средней части составляет 12,6%. Температура верхнего слоя воды в тёплое время года составляет 25-28°C, зимой в средней части моря вода не замерзает.

На Каспийском море часто бывают штормы, наблюдаются высокие волны. Вдоль восточного берега наблюдается слабое течение, направленное с юга на север. В период с мая по август бывают случаи полного затишья, иногда наблюдается крупная зыбь.

Берега северной части Каспия однообразные, низменные и очень отлогие, не имеют постоянного характера, положение их меняется в зависимости от нагона воды ветром. На большом протяжении от берега моря мелководно. Территорию северного берега пересекают обводнительные каналы. Солончаки, расположенные в понижениях между песчаными и Бэровскими буграми, корковые, глубина засоленного слоя до 0,8 м. С наступлением летнего зноя солончаки высыхают, покрываются слоем соли и становятся проходимыми для всех видов транспорта

Берег Каспийского моря в дельте р. Волги низменный, заболоченный, поросший камышом и рогозом, в половодье и при нагонах воды с моря затопляется. Глубины у берега 0,1 - 0,8 м, в 20-25 км от берега 1,5-метровые глубины, вдоль всего берега отмель шириной 10 км. Приливно-отливных явлений нет. Колебания уровня воды на 0,3 – 0,5 м у берега происходит за счёт изменения величин стока рек и сгонно-нагонных явлений.

Восточные берега характеризуются от однообразных низменных в северной части до обрывистых каменистых, начиная со средней части моря. В настоящее время на месте бывших солончаков в северо-восточной части образовался мелководный залив. Имеющиеся солончаки на восточном побережье непроходимы круглый год. Вплоть до обрывистых берегов море мелководное, изобата 5 м распространяется от 20 до 60 км от берега. Глубины акватории вблизи обрывистых берегов составляют от 57 до 250 м. Глубина 5 м вдоль данных берегов располагается на расстоянии от 100 до 1000 м от береговой линии. Высота обрывов находится в пределах 12 – 40 м. Вдоль прибрежной полосы имеются надводные и подводные камни. Береговой линией района промысла Каламкас служит дамба высотой 3 м. Волнения на море в южной части преобладают силой не более 3 баллов.

По характеру рельефа и гидрологическим особенностям Каспийское море подразделяют на Северный Каспий, Средний Каспий и Южный Каспий. Северный Каспий - самая мелководная часть моря с глубинами 4-8 м.

Растительность по береговой линии полупустынная и пустынная.

Населённые пункты – города Атырау, Актау, Форт-Шевченко, р.п. Жанбай, Сарыкамыс, Курык, с. Акшукур.

Дорожная сеть вдоль берегов представлена грунтовыми дорогами и тропами. [7].

Освоение Каспийского моря и его шельфа имеет большое значение для судоходства, рыболовства, а также для добычи нефти.

На аккумулятивных низменных берегах казахстанской части происходит пассивное затопление и заболачивание береговой полосы, подпор грунтовых и поверхностных вод, размыв ранее сформировавшихся аккумулятивных форм, затопление заливов Комсомолец, Кайдак, Мертвый Култук, Большого Сора на п-ове Бузачи, понижения Колтык к западу от г. Атырау и значительной территории природных понижений на северо-востоке по линии Байчунас-Сагиз-Макат. Пассивное затопление происходит также за счет сгонно-нагонных явлений, развивая зону осушки в некоторых регионах до отметки минус 25 м абс. На восточном побережье, вдоль чинков Мангышлакского и Тюб-Караганского плато, началось уничтожение узкой пляжной полосы, островных баров и кос, а местами возникает и абразия с обвально-оползневыми процессами. В целом, смена длительного регрессивного цикла развития Каспия трансгрессивным привела к замене преимущественного развития аккумулятивных процессов повсеместным появлением абразивных с лагунообразованиями, подтоплением и заболачиванием прибрежной территории. [8, 55-63].

Особую озабоченность вызывает обводнения нефтегазового комплекса. Консервация и ликвидация промыслов и отдельных нефтегазовых скважин выполнена без учета затопления, без изоляции от морских агрессивных вод и ледовых процессов, что может привести к ускоренному их разрушению.

Так, в марте 2001 года вследствие интенсивного ледового движения, произошло разрушение двух законсервированных нефтяных скважин на промысле Тажгали Южный. Следы растекания нефти по ледовому покрытию были зафиксированы из космоса.

В полузатопленном состоянии продолжают работать качалки, перегоняя нефть по изношенным трубопроводам, находящимся в зоне затопления. Месторождения Мартышенской, Приморской, Прорвинской и Бузачинской групп обводнены морскими и подпорными грунтовыми водами, защищаясь от полного затопления постоянно обновляющимися, технически несовершенными дамбами из местного материала (глина, песок, галька, ракушка и т.д.). довольно часто прорываемыми нагонными волнами. [8, 55-63].

Полностью затоплены месторождения Восточная Кокарна, Тажигали, Прибрежное, Пустынное, Морское. Эти объекты являются потенциально опасными и в недалеком будущем могут привести к крупным экологическим катастрофам с трудно предсказуемыми последствиями для биоты моря и значительными трудностями их ликвидации. Уже сейчас наиболее высокие уровни загрязнения углеводородами отмечаются в восточной части

Северного Каспия, где содержание последних превышает предельно допустимые концентрации (0,05 мг/л). Таким образом. Каспийское море и его побережье является для Казахстана не только источником нефтедолларов, но и серьезных экологических проблем. Причем эти проблемы переплелись в такой тугой узел, что их решение практически невозможно без комплексного анализа с помощью геоинформационных технологий и оперативного контроля методами дистанционного зондирования. [9, с. 529].

О скорости спада-подъема уровня Каспия говорят следующие цифры:

1933—1940 гг. — понижение на 1,7 м, т. е. на 24 см/год;

1977—1995 гг. — повышение на 2,5 м, т. е. на 14 см/год;

1990-1994 гг. - скорость подъема превышала 20 см/год.

Повышение же уровня Каспия на 1 м – это затопление от 10 до 25 тыс. км (в пределах высот -25...-30 м) территорий, прилегающих только к Северному Каспию, что сравнимо с площадью небольшой области, и продвижение береговой линии на 10 - 40 км в глубь суши. [10, с. 109].

Кроме того, повышение уровня Каспия на всем побережье вызывает опасные природные процессы и изменения местности:

- простое затопление территории;
- волновую переработку берегов при затоплении, особенно при штормах, вызывающую разрушение;
- инженерных сооружений береговой зоны и засорение акваторий портов;
- волновую переработку берегов при затоплении, вызывающую размыв кладбищ, мест захоронения скота и др., и, следовательно, угрозу эпидемий и эпизоотии;
- деградацию водной растительности (камышы, рогоза, тростника) мелководий, которая приводит к снижению роли ее как буфера против затопления территории ветренными нагонами морских вод, сероводородному загрязнению мест нереста и нагула ценных и частиковых пород рыб, исчезновению мест обитания редких и ценных видов птиц и животных;
- расширение зоны влияния нагонных явлений;
- повышение уровня грунтовых вод, ведущее к заболачиванию и засолению территории и, как следствие, к деградации сельскохозяйственных угодий, разрушению подземных инженерных объектов (фундаментов, трубопроводов, линий связи и других коммуникаций) агрессивными горькими и горько-солеными грунтовыми водами. [11, 150-151].

Последствия колебаний уровня Каспия приводят к изменению топографической обстановки прибрежных территорий и вызывают необходимость регулярного обновления топографических карт.

С уникальным морем-озером Каспием связана жизнь народов, расцвет и закат государств. Так, в 1 тысячелетии н. э. уровень Каспия был на отметках -32... -36м. Богатейший природный потенциал ландшафта, естественная крепость, не доступная для кочевников, и положение на ключевом пункте Шелкового пути способствовали расцвету Хазарского государства. В конце 1 тысячелетия уровень Каспия начал подниматься, и к

XI в. море затопило место обитания хазар, их столицу, остатки которой предположительно находятся на острове Чистая Банка, вытеснив их под удары кочевников. В настоящее время похожая ситуация: людей нужно выселять. [12, с. 6-14]

Все изменения уровня Каспия, как древние, так и современные, оставляют неизгладимые следы в рельефе, морфологии ландшафта и хорошо прослеживаются на материалах космической фотосъемки (КФС): береговая линия уровня -32/-36м видна в настоящее время под водой на глубине 6 – 8 м[4].

Живые и минеральные ресурсы Каспийского моря с давних времен организуют основу экономических взглядов государств, расположенных на его побережье. Транспортный потенциал Каспийского моря — это туристические и оздоровительные комплексы, а также нефтяные и газовые месторождения, запасы которого, по мнению экспертов, превышают уровень бассейна Персидского залива, превратили его в приоритет внешней и внутренней политики прибрежных государств, особенно Азербайджанской Республики. [13, с.148]. Этими качествами можно обосновать внимание, которое весь мир – ученые, политики, лидеры делового мира – уделяют в 90-е годы Каспийскому морю и Каспийскому бассейну.

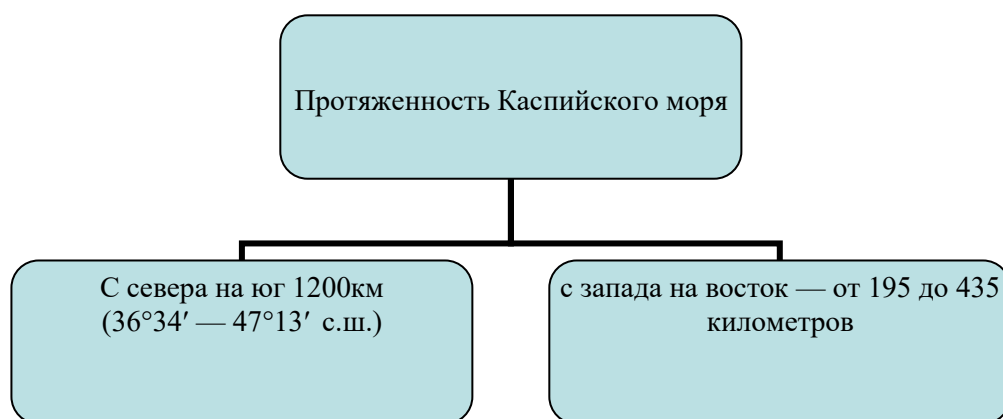


Рисунок.1.2 – Протяженность Каспийского моря

Каспийское море делится по физико-географическим условиям на 3 части — Северный Каспий, Средний Каспий и Южный Каспий. Условная граница между Северным и Средним Каспием проходит по линии Чечень (остров) — Тюб-Караганский мыс, между Средним и Южным Каспием — по линии Жилой (остров) — Ган-Гулу (мыс). Площадь Северного, Среднего и Южного Каспия составляет соответственно 25, 36, 39 процентов. [14, с. 381].

Зона Каспия и в советскую эпоху имел множество недостатков, как политического, так и экономического, экологического, гидрологического и т.д. характера. Но после 1991 года эти проблемы приобрели важный претенциозный характер, в связи с тем, что в новых условиях новые прибрежные государства в силу возникших интересов встали не на путь сотрудничества, а установления объема своих прав и выгод на данную территорию. [15, с. 11].

Уровень воды в Каспийском море подвержен значительным и постоянным колебаниям. Длительные исследования позволили выделить несколько крупных трансгрессивно-регрессивных фаз, также было установлено, что на фоне крупных фаз наблюдаются многочисленные колебания уровня более мелкого ранга. [16, с. 527-541]

По данным современной науки, за последние 3 тысячи лет амплитуда изменений уровня воды Каспийского моря составила 15 метров. Инструментальное измерение уровня Каспийского моря и систематические наблюдения за его колебанием ведутся с 1837 года, за это время самый высокий уровень воды зарегистрирован в 1882 году (-25,2 м.), самый низкий — в 1977 году (-29,0 м.), с 1978 года уровень воды повышался и в 1995 году достиг отметки -26,7 м, с 1996 года опять наметилась тенденция к понижению. Причины изменения уровня воды Каспийского моря учёные связывают с климатическими, геологическими и антропогенными факторами, связанными с активным хозяйственным освоением его акватории. Все это позволяет отнести Каспийское море к водоемам с крайне неустойчивым положением береговой линии и соответственно любое хозяйственное воздействие на прибрежные территории должно учитывать эту особенность. [17, с. 4].

Также в числе причин, влияющих на изменение уровня Каспия, называют и геологические причины. К геологическим причинам относятся тектонические процессы, которые приводят к перемене размера котловины, а также осадки, наполняющие котловину.

К геологическим условиям, которые оказывают влияние на баланс вод моря, нужно упомянуть подземный сток. Большая часть ученых утверждают, что всего лишь 35 куб.км. составляют объем подземного стока от поверхностного, и, следовательно, не в состоянии значительно влиять на уровень моря, но есть и другие мнения ученых. Одно из них говорит, что тектонические напряжения (то есть перемена растяжения и сжатия) меняются в горных породах, составляющих дно Каспийского моря, и влекут или выдавливание некоторого объема вод, наполняющих эти породы, или поглощение - что и влияет на изменения уровня [18, с. 267].

Более сложная проблема влияния тектоники на состояние уровня моря. Бесспорно, что тектонические процессы определенным образом влияли в начальный период образования впадины, которую занимает море. Значительная роль этих процессов была и в ходе эволюции, что доказывают своим существованием деформации древне каспийских морских террас и наслоение на различных гипсометрических уровнях прибрежных морских отложений одного возраста. Кажется, что доказательством тектонике служат аномалии уровневых и геодезических замеров, которые являются свидетельством того, что темпы движений тектоники возможны до 5-7 сантиметров в год. Другими словами, могут заметно влиять на перемену уровня. [19, с. 119-125].

В этих условиях знание гидрологического режима моря и его изменений, в значительной степени определяющих экологическую

обстановку, имеют практическую значимость. Однако, гидрологический режим, и особенно его изменчивость, слабо изучены. В условиях недостатка данных наблюдений роль математического моделирования режима моря существенно возрастает, поскольку позволяет без значительных материальных затрат проводить численные эксперименты по диагнозу и прогнозу гидрологического состояния вод с учетом антропогенного воздействия. Такой подход, когда изучение колебаний уровня по натурным данным сочетается с гидродинамическим моделированием и численными экспериментами, расширяет возможности научного анализа [16, с. 527-541].

Экологическая ситуация в Каспийском регионе определяется подъемом уровня Каспия и антропогенное воздействие на морские прибрежные экосистемы. Самые большие в мире месторождения нефти и газа, т. е. Тенгиз, Карачаганак, Кашаган, а также речные и морские порты на Каспийском море, т.е. РГП «Актау Интернэшнл Морской торговый порт», Атырау, Баутино, Курык расположены на побережье этого моря.

Кроме того, в регионе имеется развитая сеть нефте- и газопроводов АО «Казтрансойл», АО «КазТрансГаз», Каспийский Трубопроводный Консорциум, а также линии электропередач. Есть многие тепловые электростанции и газотурбинные электростанции в эксплуатации. Наличие богатых месторождений полезных ископаемых создают условия для роста экономики региона. Основа промышленности – нефтегазовая отрасль, на долю которой приходится около 60% промышленного потенциала региона. Сегодня общепризнано, что по крайней мере до конца третьего десятилетия XXI века нефтегазовая отрасль Республики Казахстан будет единственной движущей силой, которая сможет вывести казахстанскую экономику на передовые позиции мирового сообщества и обеспечить кардинальные изменения во всех сферах жизни населения Республики.

Западная часть Казахстана долгое время была одним из самых перспективных нефтегазовых регионов. Практически все месторождения углеводородного сырья, находящиеся в стадии промышленной разработки сосредоточены здесь. На данный момент по доказанным запасам нефти Казахстан входит в число 15 ведущих стран мира, а значительные запасы углеводородного сырья составляют 3,3% мировых запасов. Масштабная разработка месторождений нефти и газа, характеризующихся повышенным содержанием токсичных элементов, наличие крупнейшего в мире бессточного водоема – Каспийского моря и ряда транзитных реки – Волга, Жайык (Урал), Эмба и другие еще более усугубили экологическую ситуацию и требовала большого внимания к вопросам охраны окружающей среды [15, с. 11].

1.2 Современные проблемы водных объектов РК

Республика Казахстан расположена в Центральной Азии в центре Евразийского материка и занимает девятое место в мире по размеру своей территории (2,72 млн. км²). Западная граница государства проходит по акватории Каспийского моря. Приволжским степям, поднимаясь на север к южным отрогам Урала, далее на восток вдоль юга Западно-Сибирской равнины до Алтайских хребтов.

Восточная граница проходит по хребтам Тарбагатай и Джунгарии, южная - по горам Тянь-Шаня и Туранской низменности до побережья Каспия. Самая высокая точка Казахстана - пик Хан-Тенгри (6995 м н.у.м.), самая низкая - впадина Карагие (132 м. ниже у. м.).

Для Казахстана водные ресурсы являются одним из главных факторов, определяющих устойчивое социально-экономическое развитие. Поверхностные водные ресурсы по территории республики распределены крайне неравномерно и характеризуются значительной многолетней и внутригодовой динамикой. В силу климатических особенностей страны почти весь сток поверхностных источников приходится на весенний период. Это, а также зависимость от трансграничных источников водоснабжения, обуславливают неравномерную обеспеченность водными ресурсами регионов. Практически на всей территории страны имеет место напряженная водохозяйственная обстановка, вызванная не только недостатком водных ресурсов и загрязнением водных источников, которая достигла наибольшего уровня в период экономического роста, но и нерациональным использованием водохозяйственной системы, неэффективным управлением ею. Несбалансированность между способностью природной среды к восстановлению и антропогенной ситуацией, является частью проблемы водных ресурсов. Дефицит воды – одна из главных причин возникновения экологически кризисных ситуаций и социально-экологической напряженности. Подавляющая часть территории Республики Казахстан расположена в аридной зоне, главная отличительная особенность которой – дефицит пресной воды. По оценкам экспертов, для экологически безопасного индивидуального пользования необходимо не менее 5 тыс. м³ воды в год, тогда как во многих районах Казахстана в целом доступным является не более 1000-700 м³. Положение усугубляется тем, что имеющиеся ресурсы поверхностных вод Казахстана распределены крайне неравномерно по территории и во времени – от 70 тыс. м³/км² в год на юго-востоке Республики до 6,5-8 тыс. м³/км² в год в Центральном и Северном Казахстане, при этом, в маловодные годы повторяемостью раз в 20 лет удельная водообеспеченность может уменьшиться более, чем на порядок. В Казахстане уделяется большое внимание вопросу о роли экосистем в управлении водными ресурсами, таких как горные территории, водно-болотные угодья и леса, которые обеспечивают естественный сбор, фильтрацию, хранение и сохранение воды. [20].

Следует подчеркнуть, что жизненно важное значение в возобновлении водных ресурсов играют горные территории, прежде всего, тем, что именно в горах формируется подавляющая часть возобновляемых водных ресурсов, а также различные типы водноболотных угодий (ВБУ), имеющих огромное значение в водном режиме. [19, с. 119-125].

Наряду с огромным социально-экономическим значением, первостепенная роль ВБУ - сохранение природных и антропогенных гидроэкосистем, поддержание биоразнообразия, в том числе эндемичных, редких, находящихся под угрозой исчезновения видов. [20].

Водоснабжение является одной из стратегических государственных задач Казахстана. Обладая обширной территорией, многоотраслевого народнохозяйственного комплекса, Республика Казахстан переживает недостаточное и неравномерное снабжение водными ресурсами. Поэтому вопросы реставрации и рациональное использование воды в республике актуальны.

Республика Казахстан, находясь в центре Евразийского континента, является страной с дефицитом воды. В стране восемь речных бассейнов, т. е. Балхаш-Алакольская, Шу-Таласская, Арало-Сырдарьинская, Урало-Каспийская, Тоболо-Торгайская, Ишимская, Иртыш и Нура-Сарысу. Всего на реках выделено 86 водохозяйственных участков территории республики.

В пределах от 5 до 12 и более водохозяйственных участков находится всего один водоем. Ситуация с обеспеченностью поверхностными и подземными водами в отдельных регионах республики существенно отличается. Бассейн реки Ертис и Балхаш-Алакольский бассейн лучше обеспечены собственными ресурсами как поверхностных, так и грунтовые воды.

Бассейны Нура-Сарысу, Есиль и Тобол-Торгай дефицитны по грунтовым водам. Значительные площади Есильского, Жайык-Каспийского, Арало-Сырдарьинского, Тоболо-Торгайского и Нура-Сарысуиские бассейны уже испытывают нехватку как поверхностных, так и подземных вод. Так, например, в Нура-Сарысу, представляющей собой водохранилище в центре Казахстана, развитие производительных сил происходило длительное время, не без учета экологических особенностей региона с увеличением деформаций отраслевых пропорций и социально-экономической структуры. Все это привело к серьезному обострению экологической ситуации не только в промышленных центрах, но и во всем регионе. Почти ни один город этого региона в конце XX века не был обеспечен питьевой водой требуемого качества. Загрязнение окружающей среды повлияло на качество еды. Возросла заболеваемость и смертность населения, особенно в детском возрасте отраслевая структура, сложившаяся в этом регионе, стала основной причиной достаточно широкий круг экологических проблем, характер которых, в свою очередь, во многом был обусловлен деятельности конкретного производственного комплекса и степени их влияния на качество поверхностные и подземных вод. [21].

Концентрация Центрально-Казахстанских угледобывающих предприятий, цветная и черная металлургия, химия, машиностроение, рост сеть транспортных магистралей и многочисленных коммуникаций, а также высокая степень урбанизации, развитое сельское хозяйство обусловили формирование значительного уровня загрязнения всех компонентов окружающей среды.

В результате Центральный Казахстан был традиционно один из регионов с наиболее высокими удельными показателями по эмиссии выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, сброс загрязненных сточных вод. Счета региона на 16% промышленного и 13% сельскохозяйственного производства в Казахстане, более 44% улов рыбы, 75% кормовых угодий. [15, с.11].

На современном этапе важным фактором, определяющим не только экологическую обстановку, но и развитие производительных сил, является состояние водных ресурсов. Огромные объемы сбрасываемой воды привели к особым требованиям к очистным сооружениям, стоки с которых сбрасывались в водоемы. Однако многие городские очистные сооружения работают с значительными перегрузками в последние годы. Основная часть загрязненных сточных вод, которая проходит через них, была признана проверяющими органами недостаточно обработанной, т.е. не соответствующей стандарту качества питьевой воды.

Данное обстоятельство обусловило необходимость оценки санитарного состояния водных объектов региона и прогноза водопользования населения, в том числе организации строгого контроля за содержанием химических веществ, присутствующих в воде из-за промышленных, сельскохозяйственных и бытовых загрязнений.

Следует отметить, что долгосрочное загрязнение реки Нура опасными отходами, сбрасываемыми Металлургическим заводом еще долго будет оказывать негативное влияние на окружающую среду из-за вторичного загрязнения реки, накопленного за предыдущие годы донными отложениями [22, с. 85–88].

1.3 Обзор современных исследований изменения береговой линии и дна водных объектов в странах Дальнего и Ближнего Зарубежья

В соответствии Постановлением Правительства РФ от 10 апреля 2007 г. №219 «Положение об осуществлении государственного мониторинга водных объектов» мониторинг водных объектов представляет собой комплекс наблюдений, для общей сравнительной оценки, а также прогноза изменений планового положения водных объектов и ресурсов. Все гидрографические объекты, подлежащие наблюдению, входят в собственность государства и охраняются. [23, с. 329].

В России насчитываются 1,25 млн. малых, средних и 34 крупных рек, которые представляют собой основные ресурсы водоснабжения. Из них активно используются примерно 20%. Применение методов моделирования,

позволяет задействовать 20% всех рек для получения необходимых рядов гидрологических данных.

Таким образом, численность постов наблюдений, даже исходя из расчета 1 пост в речной зоне, должно составлять ~ 50000 шт. Действующая сеть гидрологических наблюдений Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды включает 3085 гидрологических постов, из них на реках 2731 постов. Это составляет менее 6% от требуемого объема постов. Из 2290 водохранилищ России, наблюдениями подвержено не более 16%. В настоящее время актуальны вопросы, связанные с нахождением источников негативного воздействия, контролем протекающих процессов, как в самих водных объектах, так и в пределах их водоохранных территорий. [23, с. 329].

Мониторинг береговой линии основывается на батиметрических картах и цифровых моделях рельефа котловины водоема масштаба (масштаба 1:25 000) основная акватория водоема, и (1:10 000) мелководные области водоема, сформированных в результате измерений глубины в точках с определенными географическими координатами [24, с. 4529-4556]. В результате чего выявляются основные морфометрические характеристики объекта водного типа (объем, площадь, максимальная глубина, количество островов, протяженность береговой линии).

Соединенные Штаты Америки начиная с 1970 г. используют систему наблюдения за прибрежной зоной на постоянной основе. Данным видом деятельности занимается агентство по исследованию состояния океанов, а также атмосферы (NOAA). Первоначальным исследованиям прибрежных зон руководствовало агентство, проводившее съемку побережья, основанное Томасом Джефферсоном еще в 1807 году. Самая первая непростая задача заключается в управлении прибрежной зоной.

Данная задача заключается в определении местоположения водных объектов и прилегающим к ним территориям. Из высказывания специалиста в области информационных технологий, работающего в Центре береговой службы NOAA Синди Фоулера, достоверное определение положения береговой линии является важной точкой в данном направлении работы и исследований агентства. Береговая линия является критически важной и значимой границей земельных владений. Граница водного объекта обуславливает выбор разновидностей для возможности использования определенного участка местности, который может возникнуть вследствие потенциальной опасности, в результате затопления и штормов, а также для принятия своевременных мер предосторожности. Береговая линия также проходит по международным границам государств, а также определять область юрисдикции страны [25, с. 66].

Установление береговой линии производится по среднему числу уровня воды во время большего прилива воды. Поскольку ее протяженность, с учетом Великих озер, составляет в США более 95 тысяч миль, деятельность NOAA по контролю прибрежной зоны достаточно масштабна. А наблюдающееся в последний период времени повышение уровня мирового

океана повышает значимость и необходимость использования мониторинга изменений побережной зоны.

Для сбора информационных данных о топографии прибрежной территории, агентство наиболее часто применяют приборы, снабженные лазерными сканерами, такие как Лидары (от LIDAR: Light Detection And Ranging – Оптическая регистрация и измерение). Такие приборы устанавливаются на летательных аппаратах. Они обеспечивают съемку земной поверхности с высокой точностью [26, с. 30].

Сканер формирует высокочастотный лазерный импульс и принимает отраженный от земли сигнал, который отражается от земли с определенной частотой и интенсивностью [27, с. 495]. Его параметры во многом зависят от высоты съемки и качества подстилающей поверхности. Затем сигнал обрабатывается с учетом данных бортового GPS-приемника внутренними подсистемами сканера.

Сведения LIDAR могут быть представлены в ГИС в форме наборов точек, гридов или изолиний. Для данных о параметрах высоты предпочтительнее подходит формат грид, в котором снимаемая область делится на ячейки, и каждой ячейке присваивается значение определенной высоты в соответствии с поверхностью над уровнем моря. Комплект данных в виде грида обеспечивает более равномерное и непрерывное отображение плоскости и предоставляет лучшие возможности для анализа, управления и отображения геоинформационных данных. [28, с. 36]. В NOAA разработано расширение к ArcView Spatial Analyst, названное LIDAR Data Handler. Оно устанавливает ряд опций для отображения и работы с наборами данных LIDAR в виде гридов [25, с. 66].

Минуя фиксацию местоположения береговой линии, NOAA занимается картированием прибрежных морских акваторий с целью определения таких значимых характеристик как распределение солености воды, местоположение мест обитания различных видов морских животных и растений, масштабы и степень загрязненности прибрежной зоны. Охрана прибрежных вод от загрязнения – еще один важный вид деятельности NOAA. Исторически сложилось так, что множество программ экологического контроля направлено на отслеживание за локальными источниками загрязнения, связанными с промышленной деятельностью или сбросом сточных вод. Однако благодаря продуктивному наблюдению и управлению этими объектами обнаружилось, что в настоящее время загрязнение берега в большей степени определяется неточечными источниками, оно, главным образом, связано с дождевым смывом земной поверхности и содержащихся в ней загрязнителей с участков водосборов в прибрежные воды [29, 140].

Исследование водных объектов в Республике Казахстан формируются как комплекс выполняемых по научно-обоснованным программам наблюдений, оценок, прогнозов и разрабатываемых на их основе норм рекомендаций и вариантов управленческих решений, требуемых и достаточных для обеспечения управления обстановкой окружающей среды и экологической безопасностью.

Акватория Казахстана насчитывает весьма небольшое количество водных объектов в сравнении с державами европейской и сибирской территорией СНГ, но является преобладающим среди ряда государств центральной Азии. Статистические данные водных ресурсов Казахстана ведется рядом уполномоченных органов: Казгидромет, Статистика водных ресурсов РК, КГН МИИР, КВР МСХ, КГСЭН МЗ, КС МНЭ РК.

В зависимости от поставленных задач каждая организация формирует различные статистические показатели:

- Комитет по водным ресурсам Министерства сельского хозяйства РК формирует статистические данные по забору, использованию и водоотведению вод в РК;

- Комитет по статистике Министерства национальной экономики РК формирует статистические данные по водопроводу, канализации и их отдельных сетей в РК;

- Гидрометеорологическая служба «Казгидромет» формирует статистические данные по состоянию и качеству поверхностных вод в РК;

- Комитет геологии и недропользования Министерства по инвестициям и развитию РК формирует статистические данные по состоянию и качеству подземных вод [30].

В таблице 1.1. представлены картографо-геодезические предприятия, которые выполняют работы в данном регионе.

Таблица 1.2 - Перечень ранее выполненных топографических работ

Организация, выполнившая работу (год исполнения)	Название объекта	Метод съемки	Масштаб
РГКП «Южгеодезия» 1998 г.	«Атырауский» тех.отчет по обновлению топографических карт	Обновление карт	1:25 000
РГКП «Алматы геокарт» 1992-1998 гг.	«Сау-Утесский» тех.отчет по обновлению топографических карт	Обновление карт	1:25 000 1:50 000 1:100 000
РГКП «Алматы геокарт» 1991-1994 гг.	«Кайдакский» тех.отчет по обновлению топографических карт	Обновление карт	1:25 000 1:50 000 1:100 000
РГКП «Алматы геокарт» 1991-1994 гг.	«Каменный» тех.отчет по обновлению топографических карт	Обновление карт	1:25 000

1.4 Опыт применения данных дистанционного зондирования в Республики Казахстан

Данные дистанционного зондирования Земли являются уникальным источником информации которые решает ряд определенных задач посредством оперативной оценки состояния территории и создания картографической базы для ГИС. Широкий спектр информационных возможностей материалов различных видов космической фотосъемки позволяет эффективно внедрять их при исследованиях на региональном, локальном и детальном уровнях [31, с. 206-209]. Примером могут служить результаты дешифрирования разновременных КС побережья Северного Каспия, участков на восточном (п-ов Челекен) и южном (дельта реки Сефидруд) берегах, а также островов Малый Жемчужный, Укатный, Жесткий, которое выполнялось в интерактивном режиме в программном продукте ArcView. Топографические карты на данную территорию устарели. Их обновление – процесс длительный и сложный.

Дистанционное Зондирование Земли (ДЗЗ) состоит в исследовании и наблюдении состояния земной поверхности посредством множества вариаций космических средств (наземные, авиационные и др.), которые технологически оснащены различными типами съемочной аппаратуры [32, с. 148]. ДЗЗ обширно используется для разных видов работ, начиная от изучения природных ресурсов до мониторинга изменения береговой линий водного покрова. Данные подобного зондирования предоставляет пользователю получать сведения о небезопасных, сложно доступных и быстро движущихся объектах, а также осуществлять исследование на обширных участках территории.

Главная задача мультиспектральных задач и извлечения данных – это объекты и территории, излучающие энергию, которое дает возможность акцентировать их на фоне окружающей среды [33, с. 23]. Как правило, самая подходящая время для получения данных методом дистанционного зондирования считается летний период времени, так как в этот период наибольший угол солнца над горизонтом и долгая длительность дня [34, с. 20].



Рисунок 1.3 – Съемка с искусственного спутника Земли

На сегодняшний день используют различные методы для изучения водного объекта, такие как аэрофотосъемка, наземный метод, космическая съемка, батиметрия, альтиметрия, как показано на рисунке 1.4.

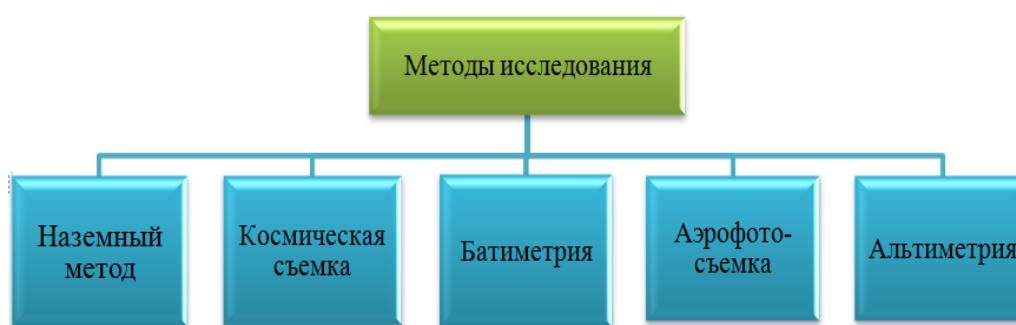


Рисунок 1.4. - Методы исследования водных объектов

Космическая съёмка

Данный метод спутникового исследования является эффективным методом извлечения водных объектов в больших масштабах. Радиолокационные изображения, такие как изображения радара с синтезированной апертурой, могут проникать через облака и предоставлять возможности для идентификации водных объектов, когда наблюдения на месте затруднены из-за неблагоприятных погодных условий. Снимки земной поверхности, полученные путём космической съемки, отличаются тем, что при целостном (и более объективном, чем на картах) характере изображения местности они охватывают огромные площади (на одном снимке от десятков тысяч км² до всего земного шара) [35, с. 31].

Это позволяет изучать по космическим снимкам основные структурные, региональные, зональные и глобальные особенности

атмосферы, литосферы, гидросферы, биосферы и ландшафты нашей планеты в целом.



Рисунок 1.5.- Снимки полученные с космического аппарата

При проведении работ возможна повторная съёмка местности в течение одного и того же полёта носителя, т. е. через краткие промежутки времени, что позволяет изучать динамику как природных явлений, периодических (суточных, сезонных и др.) и эпизодических (извержения вулканов, лесные пожары и др.), так и различных проявлений хозяйственной деятельности (уборка урожая, заполнение водохранилищ и др.). Космическая съёмка даёт основу для разработки комплексных мероприятий по борьбе с загрязнением воздуха, суши и морей [36, с. 203]

1.5 Современные подходы изучения береговой линии Каспийского моря

Батиметрический метод

Батиметрическая съёмка позволяет получить данные о рельефе дна для составления навигационных топографических карт и планов, профилей водных объектов при производстве инженерно-гидрографических изысканий. Данный вид съёмок выполняется с помощью батиметрической лазерно-локационной системы, размещаемой на самолете (воздушный лазерный сканер). Гидрография измеряет физические характеристики водоемов с их прогнозированием изменений с течением времени, что включает в себя не только батиметрию, но также форму и характеристики береговой линии, характеристики приливов, течений, волн, а также физические и химические свойства воды в целях безопасной навигации [37, с. 147-162]. Метод Батиметрии количественной оценки глубин для изучения топографии

водоемов, включая океаны, моря, реки, ручьи и озера. Измерение батиметрии с использованием спутниковых снимков является одним из фундаментальных исследований в области дистанционного зондирования (ДЗ) морской среды, которое имеет многочисленные практические приложения к прибрежной среде и ее мониторингу. На рисунке 1.6 показан пример выполнения батиметрической съемки с использованием летательных аппаратов.

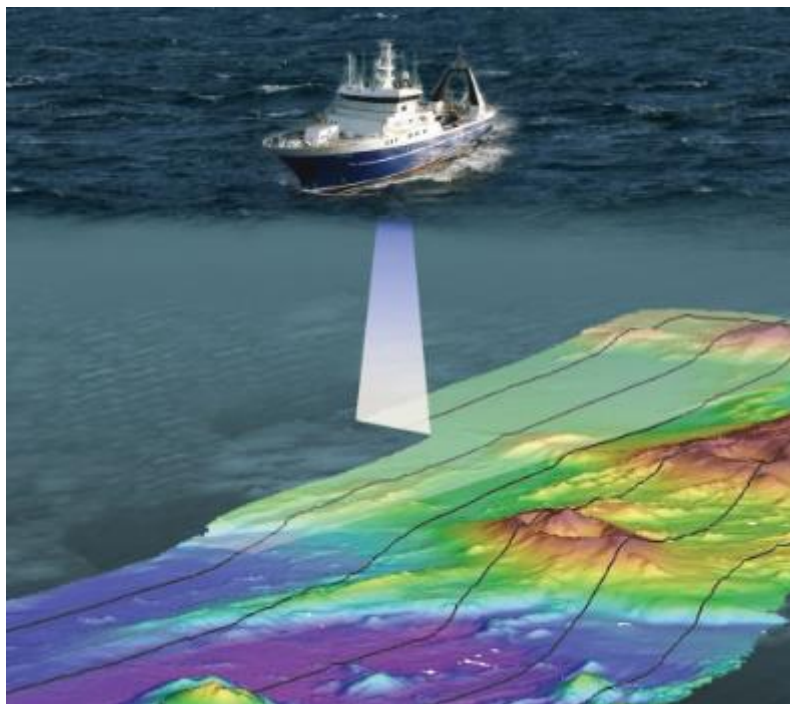


Рисунок 1.6. Образец батиметрической съемки.

Воздушное лазерное сканирование имеет высокую производительность работ (до 2500 км² в сутки при съемке, производимой в масштабе 1:25 000). Батиметры также устанавливаются на авиационных носителях, но в отличие от классических локаторов для съемки поверхности суши здесь сканирование осуществляется с помощью двух лазерных лучей, относящихся к различным спектральным диапазонам.

Излучение в ближнем инфракрасном диапазоне используется для получения отражения водной поверхности, а излучение в видимой части спектра, позволяет лазерному импульсу проникать в толщу воды и доходить до дна. Приемник обеспечивает регистрацию обоих отраженных сигналов, благодаря чему появляется возможность корректно оценить влияние рефракции и измерить наклонные дальности до точек встречи с водной поверхностью с дном [38, с.292].

Аэрофотосъемка

Для создания обновленных карт масштаба 1:25 000 береговой полосы моря выполняется используя снимки аэрозалета масштаба 1:50 000 с фокусным расстоянием 100 мм.

На участке береговой полосы, где отсутствуют снимки выполняется новая аэрофотосъемка масштаба 1:50 000.

Плановая и высотная привязка аэроснимков выполняется для обновления топографических карт береговой полосы водных объектов. Так как районы подвергаются большим изменениям и отсутствует возможность использовать прежнюю плановую привязку аэроснимков, на объекте предусматривается произвести разряженную привязку аэроснимков приборами GPS с последующим фотограмметрическим сгущением точек [39, с. 349-362].

Главной геодезической основой проектируемых работ служит пункт триангуляции 1, 2, 3 и 4 классов, включенные в каталоги ВТУ и объектовые каталоги. Высотной основой – реперы нивелирования I, II, III, IV классов, включенные в сводные каталоги высот.

Основным документом для осуществления аэрофотосъемки на данном участке является технический проект, которым определяется основные параметры аэрофотосъемки (высота фотографирования, продольное и поперечное перекрытия, базис фотографирования, расстояние между маршрутами, количество требуемых фотоматериалов).

На начальном этапе определяются границы съемочных участков. Для этого по заданным значениям масштаба аэрофотосъемки и фокусного расстояния вычисляется высота фотографирования и по формуле (1) проверяют, удовлетворяют ли характеристики рельефа местности требованиям аэрофотосъемки [4].

$$(h_{max} - h_{min})/H < 0.2 \quad (1.1)$$

Метод альтиметрии

Альтиметрическое измерение выполняется путем отправки радиолокационного импульса с космического корабля на Землю и измерения времени, необходимого сигналу для прохождения пути туда и обратно от космического корабля до поверхности океана и обратно. Поскольку сигнал распространяется со скоростью света, первым требованием является очень точное измерение времени прохождения пути туда и обратно. Положение спутника также должно быть точно известно, что достигается с помощью радиолокации, лазерного слежения и Глобальной системы позиционирования (GPS). Поскольку орбита спутника меняется в зависимости от небольших изменений гравитации Земли, этот фактор также необходимо учитывать. Чтобы определить изменчивость поля высоты поверхности океана, измерения должны проводиться относительно геоида, гипотетической формы гравитационного поля Земли, которая формирует средний уровень моря. Одной из главных причин того, что точность альтиметрии со временем улучшилась, является улучшение моделей геоида [40, с.161-202]. На рисунке 1.7 изображена схема данной съемки.

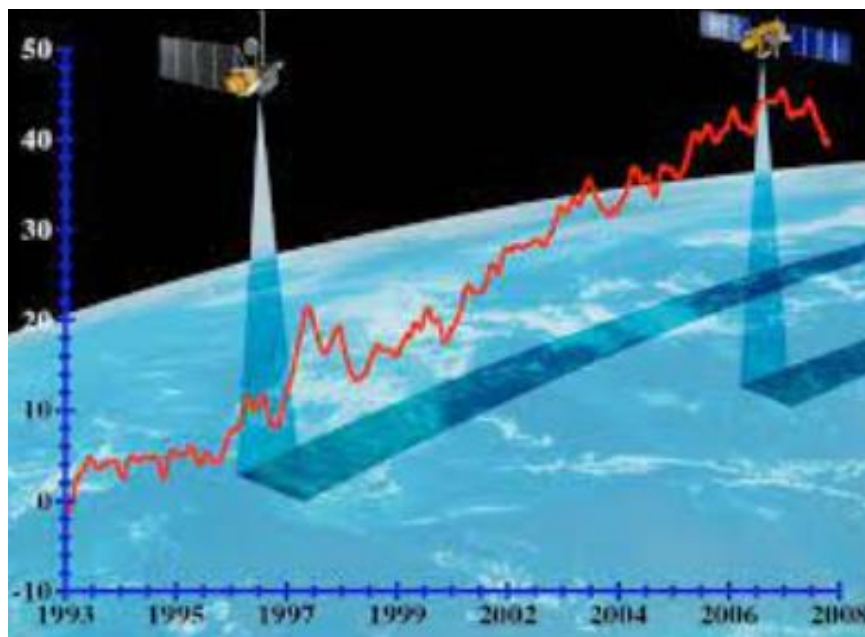


Рисунок 1.7. Образец съемки спутниковой альтиметрии

Для работы по огромному региону Северного Каспия использовались материалы съемки, полученные камерами КАТЭ-200 (формат кадра 18 x 18 см, разрешение 15 - 30 м, площадь 50 600 км²) и МК-4 (формат кадра 18 x 18 см, разрешение 6 - 14 м, площадь в кадре 20 700 км²). По фактическому положению уреза воды на снимках проведены береговые линии: - 29,06 м – 1977 г., - 28 м – 1984 г., - 27 м – 1992 г.

Сделан прогноз положения уреза моря при уровне Каспия – 26 и - 25 м. При этом учитывалась современная тенденция колебания уровня моря и волновая переработка берегов.

Фактически с 1977 по 1992 г. затоплено более 40 тыс. км суши. По прогнозу, при положении уреза на отметке – 25 м будут затоплены еще около 50 тыс. км. В зону затопления попадают активно разрабатываемые месторождения нефти полуострова Бузачи (Казахстан): Каражанбасское, Большесорское, Каламкаское и др., а также газовое месторождение Тенгиз. При вполне вероятных авариях на них – это экологическая катастрофа для Северного Каспия и тяжелые последствия для всего моря. Пострадают города Каратон, Атырау, Лагань.

Инфраструктура интенсивно освоенной хозяйственной деятельностью территории дельты Волги, принадлежащей России, привязана к отметке -28 м. Поднятие уровня с -29 (1977) до -28 м (1984) не вызвало серьезных негативных последствий. Основной удар приняла на себя буферная зона (мелководья авандельты, поросшие тростником и рогозом). Поднятие еще примерно на 1 м с 1984 до 1992 гг. уже существенно повлияло на приморскую зону дельты. Началась деградация буферной зоны. Приморские районы стали подвергаться сильному влиянию нагонов (моряны). Поднялся уровень грунтовых вод, началось подтопление населенных пунктов [4].

Полученные данные со снимков дают возможность прогнозировать возможных последствий экологических и экономических бедствий. В настоящее время получение достоверной информации об объекте позволяет выбрать способ оперативного предупреждения чрезвычайных ситуаций, а также методов сбора информации о состоянии интересующей территории (страны, края, города), необходимой для принятия правильных и своевременных управленческих решений [5].

Картирование береговой линии представляет собой инфраструктурную работу по охране окружающей среды и прибрежным управлением ресурсами. Традиционная наземная съемка известна как важный метод картографирования береговой линии, но передача информации от наземной съемки до карт береговой линии всегда требует много времени и денег. В пользу большого охвата, своевременности, динамичности и низкой стоимости, удаленности зондирование становится широко используемым методом для пространственно-временного картографирования и обнаружение изменения береговой линии [41, с. 26].

В целом, дистанционное изображение с более высоким пространственным разрешением с большей вероятностью будет выделять береговую линию с более высокой точностью. Но приобретение изображений с высоким пространственным разрешением всегда непомерно дорого, а нечастые повторные посещения затрудняют выделение береговой линии на большой территории.

При таких обстоятельствах - изображения дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения, особенно серии Landsat, довольно популярны в задачах определения береговой линии благодаря свободному доступу, долгосрочным данным, а также большому охвату.

Однако проблема применения снимков серии Landsat для выделения береговой линии — это относительно грубое пространственное разрешение полос МС, что всегда ограничивает точность выделения береговой линии. Примечательно, что помимо мультиспектральных (МС) диапазонов, Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) датчики одновременно захватывают 15-метровый панхроматический (PAN) диапазон [42, 314-323].

Традиционно принято улучшать точность извлечения береговой линии из изображений Landsat OLI путем объединения диапазонов MS и PAN с хорошо известными подходами к pan-sharpenning.

При этом используется pan-sharpenning - процесс объединения изображений в пространственной области, основная задача которого заключается в передаче высокочастотного содержания изображения с высоким разрешением (обычно панхроматического) изображению с низким разрешением (обычно мультиспектральному) [43, с. 10].

Pan-sharpenning может увеличить пространственное разрешение изображения MS до того же, что и разрешение изображения PAN, в то время как сохранить спектральные характеристики первичного МС-изображения.

Однако в реальных сценариях, изменение горизонтального положения береговой линии может быть меньше, чем пространственное разрешение диапазона Landsat OLI PAN в зависимости от уклона берега, диапазона приливов, волновых/погодных условий, и типы побережья. Для определения мгновенного положения береговой линии необходимо найти более подробную информацию об изменениях этого положения, и преодоления слившихся объектов. Изображение Landsat MS, полученное методом панорамирования, все еще может быть недостаточным для обеспечения малозаметной изменчивости отступления береговой линии и опережающую информацию. [42, 314-323].

Таблица 1.3 - Преимущества и недостатки методов исследования водных объектов

Методы	Преимущества	Недостатки
Наземный метод	Прост в исполнении, не требует больших материальных затрат, мониторинг береговой линии производится непосредственно наблюдателем	Не отвечает требованиям по охвату территории, по точности и качеству измерений, в из-за большой протяженности водных объектов, ограниченность по погодным условиям
Аэрофотосъемка	Маловысотная, высокое разрешение на местности, достоверность информации, возможна детальная съемка мелких объектов, создание панорамных снимков, экологическая безопасность	Высокая стоимость, не отвечает требованиям по охвату территории из-за большой протяженности водных объектов
Космический метод	Оперативность, непрерывность и достоверность информации, большой охват территории, высокая периодичность регистрации состояния водных масс и прибрежных территорий	Большая стоимость снимков высокого разрешения
Батиметрия	Воздушно лазерное сканирование – высокая производительность работ (до 2500 км ² в сутки при съемке в масштабе 1: 25 000) мультилучевой сонар – высокая точность работ (до 5 сантиметров в плане и по глубине).	Большая стоимость снимков высокого разрешения
Альтиметрия		Большая стоимость снимков высокого разрешения

Для решения задач, связанных как с изучением гидрометеорологического режима моря, так и информационным обеспечением природ хозяйственной деятельности на Каспии, используются данные инструментальных измерений на метеорологических станциях, уровнях и волномерных постах, расположенных вдоль побережья Каспийского моря. Эффективность получаемой информации во многом зависит от качества наблюдений. Анализ данных показывает, что во многих случаях качество этих наблюдений низкое. Это обусловлено отсутствием полной информации обо всех изменениях гидрометеорологического и гидродинамического режимов, несовершенством методики наблюдений и аппаратуры [44, с. 52-56].

2 КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАЗЕМНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

2.1 Инструментальные наблюдения

Традиционно для выполнения мониторинга за смещением земной поверхности используют геодезические методы. Для изучения современных движений земной коры применяют повторные триангуляции и измерения линий базисов. Основным методом определения современных горизонтальных движений земной поверхности является построение линейноугловой сети и траверсов полигонометрии. Измерения в линейноугловых сетях выполняют с точностью триангуляции, трилатерации и полигонометрии 1 и 2 классов. Наиболее точным методом изучения вертикальных движений является метод повторного высокоточного нивелирования, а также GPS измерения. Данные методы позволяют не только получить цифровую модель местности, но и оценить вертикальные и плановые смещения земной поверхности с высокой точностью [45, с. 205].

Объектом исследования является береговая линия Каспийского моря (см. рисунок 1).

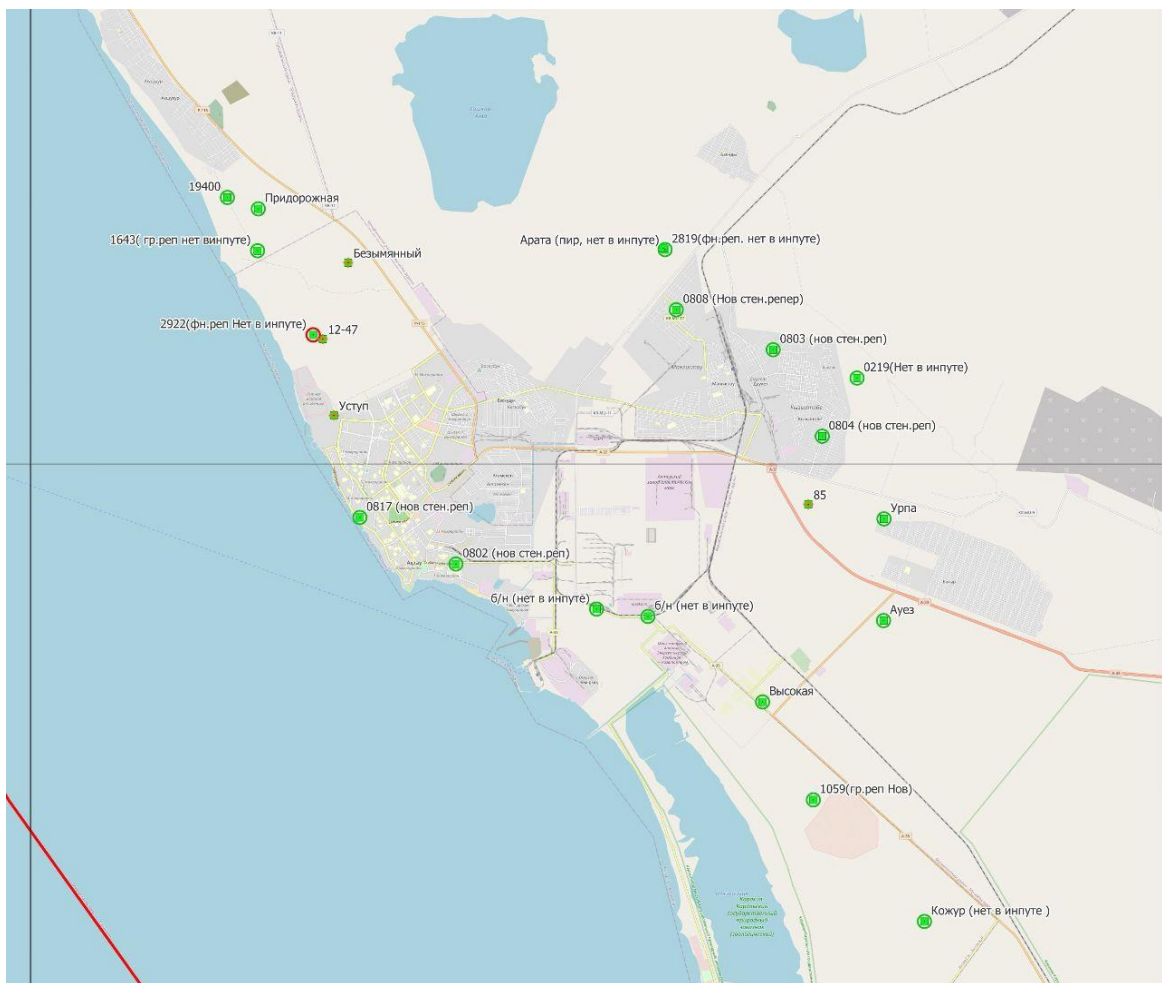


Рисунок 2.1 - Береговая линия Каспийского моря

По результатам предоставленных материалов на территории Каспийского моря за период 2015-2024 гг. было выполнено 9 серий инструментального мониторинга на следующих пунктах: «Спутник, Высокая, 1643, Ауез-Урпа, 2819, 2922, 1059, 0808, Кожур» (рисунок 1).

По каждой из профильных линий проведено 9 серий измерений за период с 2015-2024 гг. Подробные результаты измерений представлены в отчетах ТОО " ФИЛИАЛ «ОҢТУСТІКГЕОДЕЗИЯ».

Нивелирование II класса на объекте исследования выполнено цифровым нивелиром DNA03 и LS (LS10 0.3mm) с маятниковым компенсатором с магнитным демпфером фирмы «Leica Geosystems» (Швейцария) филиалом «Оңтүстікгеодезия» РГП «НЦГПИ» в 2022г.

Таблица 2.1

Основные сведения о нивелире приведены в таблице 2.1.

Тип и номер нивелира	Диаметр объектива, мм	Увеличение трубы	Минимальное расстояние визирования, м	Коэффициент дальности	Погрешность компенсатора, сек.	Ср.кв. ошибка измерения превышения на станции, мм
1	2	3	4	5	6	7
DNA03	36	25*	0,6	100	0,3	0,15
LS (LS10 0.3mm)	36	32*	0,6	100	0,3	0,3

До выезда на полевые работы в поверочной лаборатории метрологической службы филиала «Алматыгеодезия» («Казгеокарт») выполнялись следующие поверки и исследования нивелиров:

- а) внешнее состояние и комплектность;
- б) работоспособность и взаимодействие подвижных узлов нивелира;
- в) определение метрологических характеристик:
 - определение угла i ;
 - определение диапазона работы компенсатора и систематической погрешности установки компенсатора;
 - определение коэффициента дальности и асимметрии нитей.

Исследования выполнены по программе, изложенной в Инструкции 1.3.4.

В течение полевого периода выполнялись следующие исследования и поверки нивелиров:

- а) поверка и юстировка установочного уровня (ежедневно перед началом наблюдений);

б) определение угла между горизонтальной плоскостью и визирной линией (раз в 15 дней);

в) определение цены деления шкалы оптического микрометра для разных расстояний до рейки (один раз в два месяца);

г) определение погрешности самоустановки визирной линии нивелира и компенсации (один раз в два месяца).

Поверки производились согласно требованиям «Инструкций» 1.3.1 и 1.3.4.

Для нивелиров DNA03 и LS (LS10 0.3mm) дистанция измерений составляет от 0,6 до 110 метров.

Увеличение зрительной трубы равно 25* и 32* ввиду наблюдений не визуально, а электронным методом.

Принцип измерения нивелиром DNA 03 и LS (LS10 0.3mm) заключается в сравнении с имеющимся кодом в инструменте и кодом, полученным при измерении с рейки [46, с. 105]. Измерения выполняются сканированием диапазона измеряемой части рейки лазером. Самонаблюдения на рейку продолжаются в течение 5-8 секунд.

Для высокоточного нивелирования использовались следующие лимиты расстояний, при которых помехи минимальные:

0 – 10 метров при 100% видимости;

10 – 50 метров при 80% видимости.

При наблюдениях применялись двойные измерения – $B_1F_1F_2B_2$ и $F_1B_1B_2F_2$.

Нивелирование II класса выполнялось с наивысшей точностью с помощью современных приборов и методов наблюдений, позволяющих наиболее полно исключить систематические ошибки нивелирования [47-48].

Все работы по нивелированию выполнялись в соответствии с требованиями Основных положений о государственной геодезической и нивелирной сетей Республики Казахстан и Инструкции по нивелированию I, II, III и IV классов.

Повторное нивелирование II класса выполнено в прямом и обратном направлениях по способу «совмещения» нивелирами с компенсатором DNA 03 и LS (LS10 0.3mm).

Наблюдения на станциях и их последовательность производились в порядке, предусмотренном Инструкцией 1.3.1.

Результаты наблюдений на станциях записывались в журналах установленной формы.

В прямом и обратном направлениях нивелирование выполнялось по одной и той же трассе между фундаментальными реперами по схеме «восьмёрка».

При нивелировании в прямом и обратном направлении число станций в секциях делалось чётным и одинаковым.

При перемене направления нивелирования рейки менялись местами.

По каждой секции нивелирование в прямом и обратном направлениях выполнялось в разные половины дня.

Длина луча визирования составляла от 15 до 50 метров. Минимальная высота луча визирования над подстилающей поверхностью не допускалась менее 0,5м, а в случаях, когда длина луча визирования не достигала 25м, минимальная высота луча не допускалась менее 0,3м.

Расстояние от нивелира до реек измерялось специальным стальным тросом диаметром 2 мм.

Неравенство плеч на станции от нивелира до реек допускалось не более 1м, а накопление данных неравенств по секции – не более 2м.

На каждой станции при помощи термометра-праща измерялась температура воздуха на высоте нивелира.

Наблюдения на станциях выполнялись в утренние и послеполуденные периоды, причем начинались через полчаса после восхода солнца и заканчивались за час до его захода.

После перерыва сначала повторялось нивелирование на последней станции, а в случае необходимости и на предпоследней. Из сравнения результатов нивелирования до и после перерыва устанавливалось, какая пара костылей сохранила свое первоначальное положение, и от неё продолжали нивелирование дальше.

На каждой станции подсчитывались значения превышения по наблюдениям основных и дополнительных шкал реек и разность между отсчётами по основной и дополнительной шкалам каждой рейки.

Расхождения между превышениями и разность высот нулей реек, вычисленная и полученная из исследований, не превышали 0,7мм.

Контроль нивелирования по секции между смежными реперами и по участку между фундаментальными реперами заключался в следующем:

а) после выполнения нивелирования по секции в прямом и обратном направлениях сравнивались между собой два значения превышения; расхождение между данными значениями не превышало $\pm 5\text{мм}\sqrt{L}$.

Если расхождение получалось больше допустимого, то нивелирование по секции повторялось. Явно неудовлетворительные значения превышения исключались.

Оставшиеся два принимались в обработку, если они не расходились между собой больше указанного допуска и получены из нивелирования в противоположных направлениях.

б) после выполнения нивелирования по линии между фундаментальными реперами сравнивались значения превышений, получившиеся из нивелирования в прямом и обратном направлениях.

Нормальные расхождения между данными значениями не превышали:

$V = \pm 5\text{мм}\sqrt{L}$, где L - длина хода в километрах.

Связь проектируемой до пунктов ВГС и существующими линиями нивелирования II класса выполнялась путём включения в линию реперов и проложением контрольного нивелирования по примыкающей к нему секции существующей линии. Контрольное нивелирование при связи линий одного класса выполнялось по соответствующей методике.

Передача высот на рабочие центра пунктов ВГС производилось двумя методами:

- геометрический метод;
- тригонометрический метод.

Геометрический метод применялся в тех случаях, когда рабочий центр пункта ВГС находился на крыше с плоским или небольшим уклоном, где имелась возможность установки штатива и реек безопасно для жизнедеятельности работников задействованных на выполнении работ. Передача отметок от стенного репера на здании или основного центра ВГС до стенного репера на рабочем центре ВГС производилось геометрическим нивелированием с помощью нивелира и компарированной стальной рулетки. Для этого выбирали боковую поверхность несущих стен или стен лифтовых шахт таким образом, чтобы по этим поверхностям выполнить линейные измерения по вертикали

Тригонометрический метод передачи высоты на рабочий центр ВГС применялся в случае невозможности или небезопасности проведения работ геометрическим методом нивелирования. Передача высоты выполнялась высокоточными тахеометрами (точность измерения угла не менее 1-2") с двух точек, двумя полными приёмами. На время выполнения работ антенна референцной станции ВГС демонтировалась, без снятия верхней пластины УПЦ. На время выполнения работ на УПЦ устанавливалась отражающая система. При выполнении измерения тахеометр устанавливался на земле на расстоянии не более 100 метров от рабочего центра ВГС или на основном центре ВГС.

По мере завершения нивелирования по секциям и участкам регулярно составлялась ведомость превышений установленной формы.

По мере завершения нивелирования по секциям и участкам регулярно заполнялась ведомость превышений установленной формы.

Далее по результатам полученных данных были выполнены уравнивания превышений между реперами по всем профильным линиям с данными всех циклов наблюдений, начиная с 2021 года.

Пункт Спутник

По профильной линии Спутник наблюдения ведутся по 20 рабочим реперам. На рисунке 2 показан график вертикальных деформаций и изменения наблюдательных реперов по профильной линии Спутник за период с 2021 г. по 2024 г., т.к. данная профильная линия находится в зоне объекта исследования.

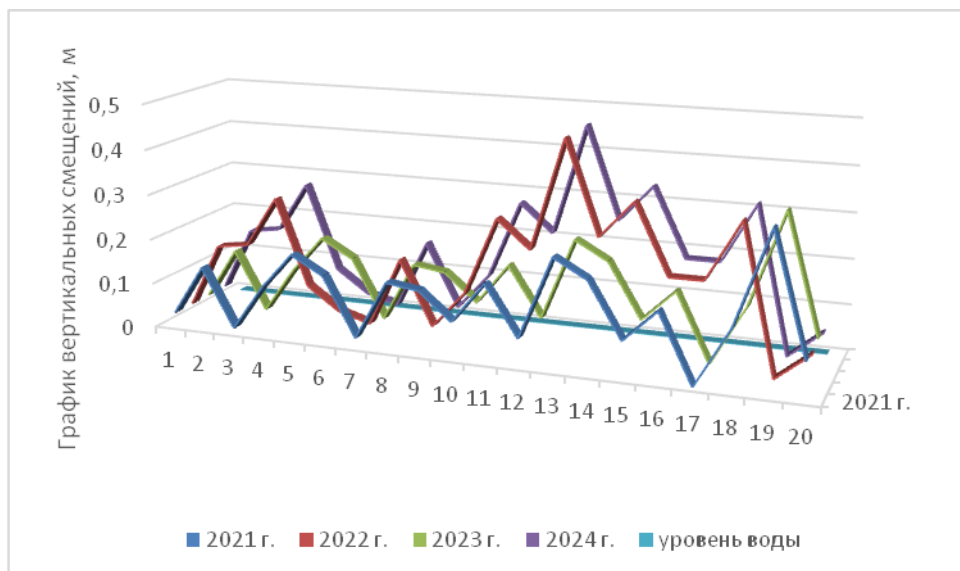


Рисунок 2.2 - График вертикальных деформаций наблюдательных реперов пункта Спутник за период с 2021 г. по 2024 г.

Пункт Высота

По пункту Высокая наблюдения ведутся по 6 рабочим реперам. На рисунке 3 показан график вертикальных деформаций и изменения наблюдательных реперов по профильной линии Высокая за период с 2021 г. по 2024 г., т.к. данная профильная линия находится в зоне объекта исследования.

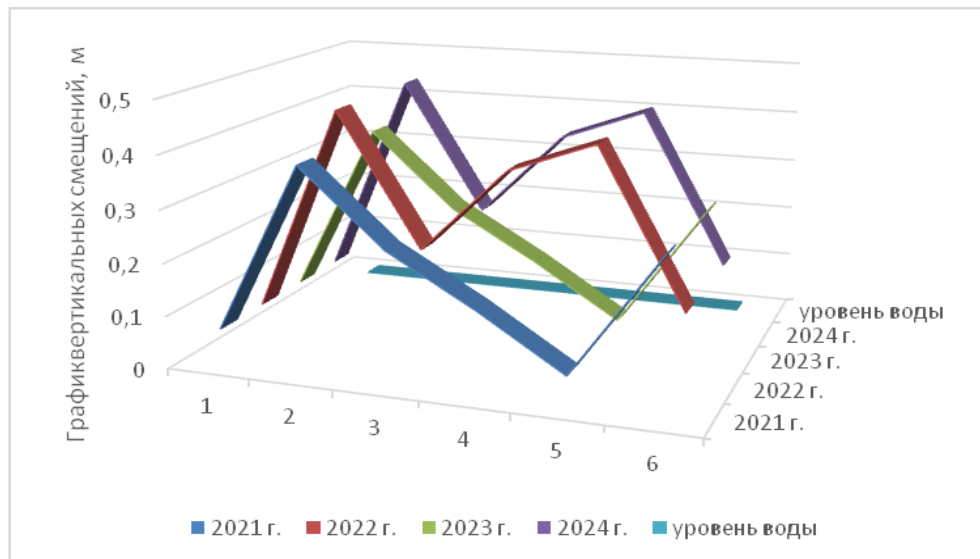


Рисунок 2.3 - График вертикальных деформаций наблюдательных реперов пункта Высокая за период с 2021 г. по 2024 г.

Пункт 1643

По пункту 1643 наблюдения ведутся по 30 рабочим реперам. На рисунке 4 показан график вертикальных деформаций и изменения наблюдательных реперов по профильной линии 1643 за период с 2021 г. по 2024 г., т.к. данная профильная линия находится в зоне объекта исследования.

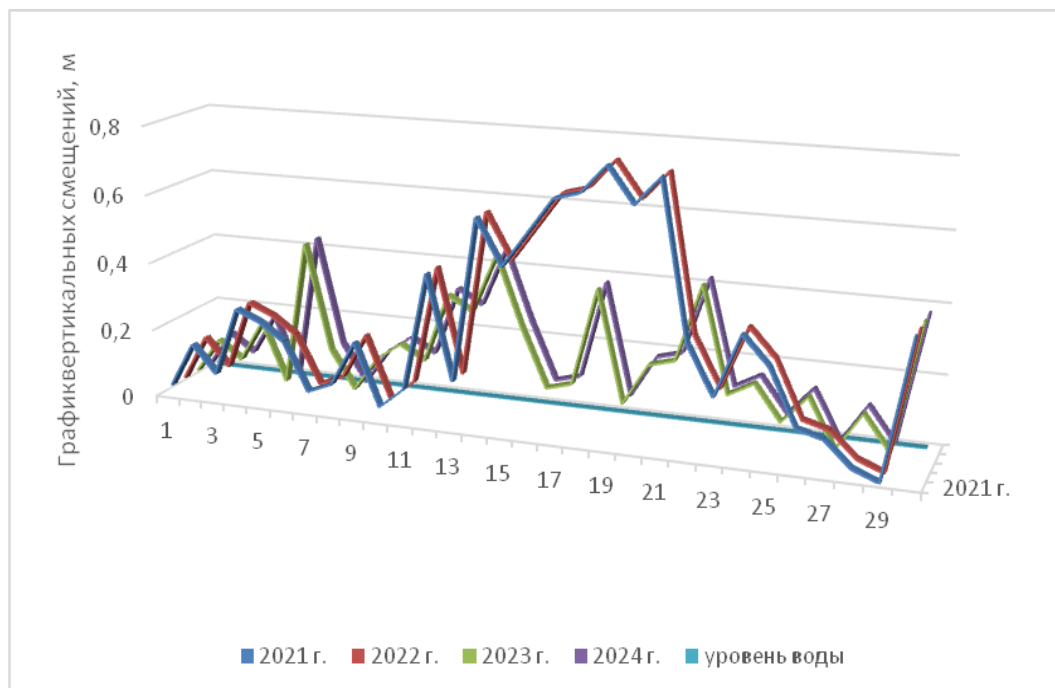


Рисунок 2.4 - График вертикальных деформаций наблюдательных реперов пункта 1643 за период с 2021 г. по 2024 г.

Пункт Ауез-Урпа

По пункту Ауез-Урпа наблюдения ведутся по 30 рабочим реперам. На рисунке 4 показан график вертикальных деформаций и изменения наблюдательных реперов по профильной линии Ауез-Урпа за период с 2021 г. по 2024 г., т.к. данная профильная линия находится в зоне объекта исследования.

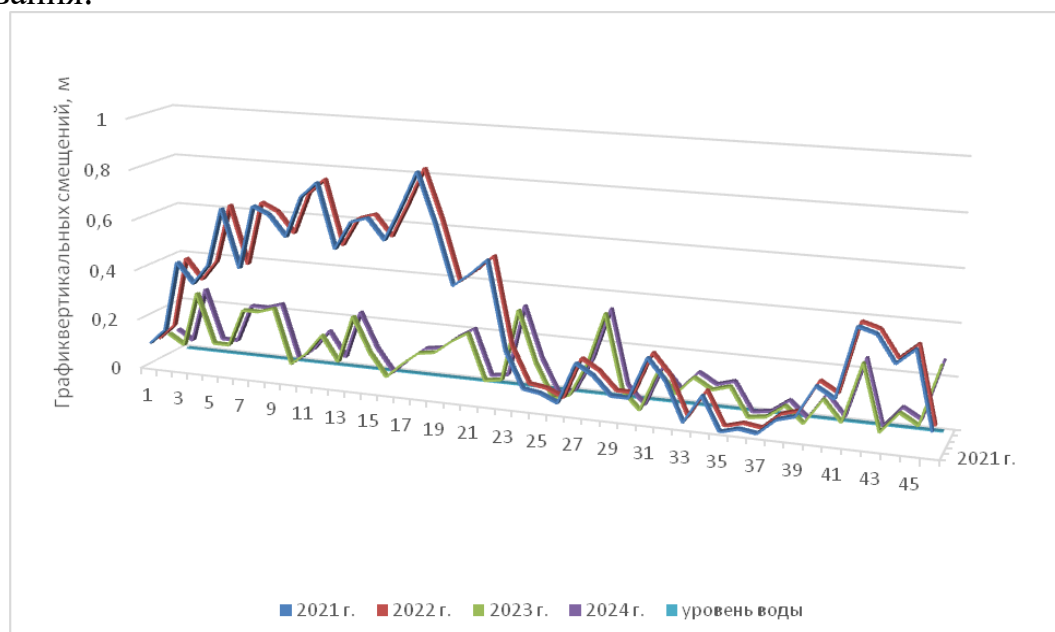


Рисунок 2.5 - График вертикальных деформаций наблюдательных реперов пункта Ауез-Урпа за период с 2021 г. по 2024 г.

Пункт 2819

По пункту 2819 наблюдения ведутся по 30 рабочим реперам. На рисунке 4 показан график вертикальных деформаций и изменения

наблюдательных реперов по профильной линии 2819 за период с 2021 г. по 2024 г., т.к. данная профильная линия находится в зоне объекта исследования.

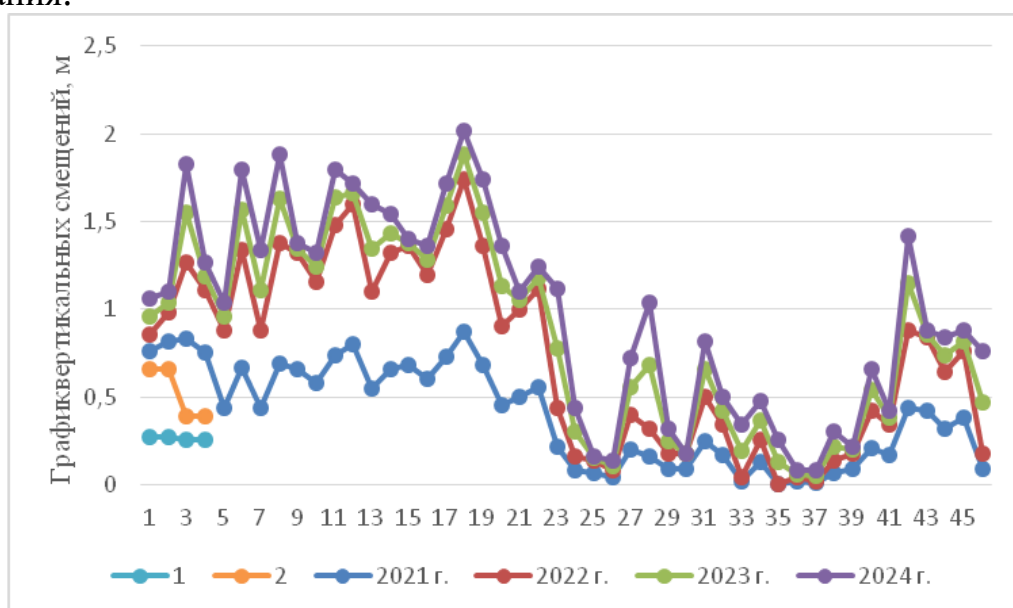


Рисунок 2.6 - График вертикальных деформаций наблюдательных реперов пункта 2819 за период с 2021 г. по 2024 г.

Пункт 2922

По пункту 2922 наблюдения ведутся по 30 рабочим реперам. На рисунке 4 показан график вертикальных деформаций и изменения наблюдательных реперов по профильной линии 2922 за период с 2021 г. по 2024 г., т.к. данная профильная линия находится в зоне объекта исследования.

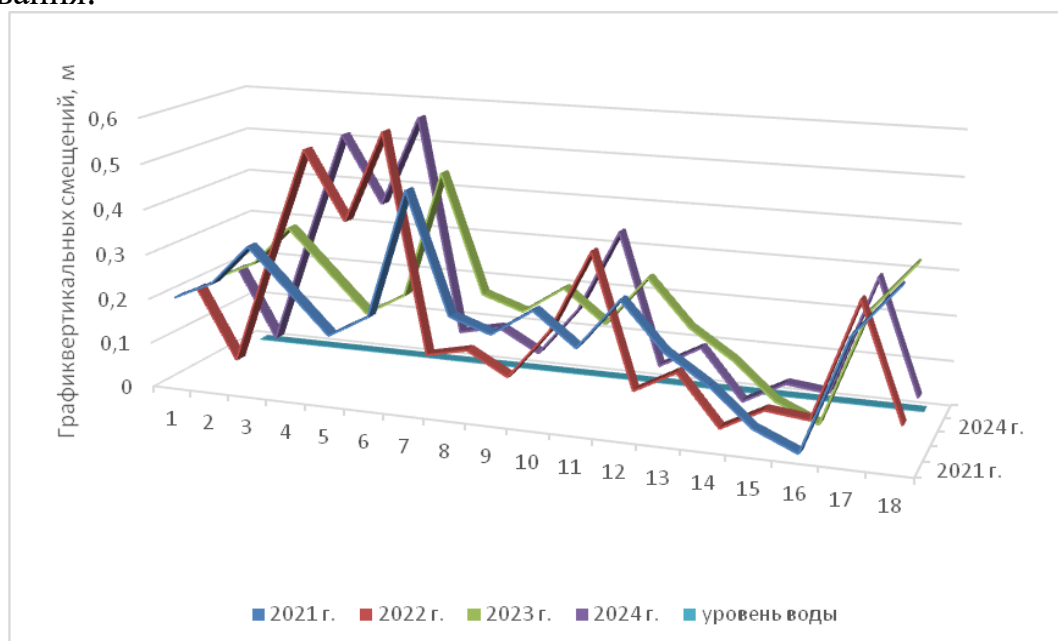


Рисунок 2.7 - График вертикальных деформаций наблюдательных реперов пункта 2922 за период с 2021 г. по 2024 г.

Пункт 1059

По пункту 1059 наблюдения ведутся по 46 рабочим реперам. На рисунке 4 показан график вертикальных деформаций и изменения наблюдательных реперов по профильной линии 1059 за период с 2021 г. по 2024 г., т.к. данная профильная линия находится в зоне объекта исследования.

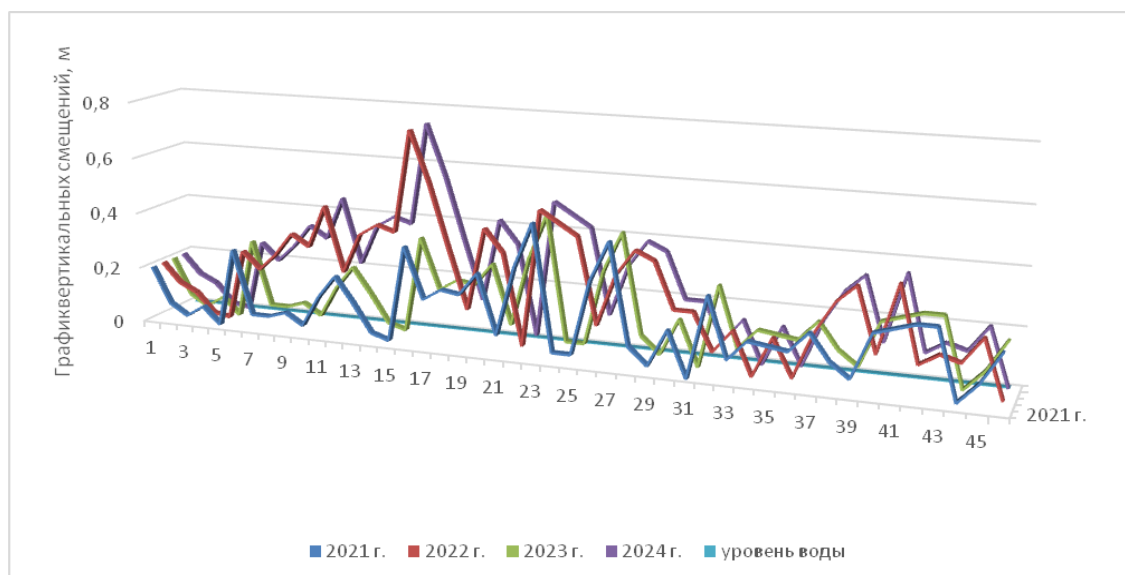


Рисунок 2.8 - График вертикальных деформаций наблюдательных реперов пункта 1059 за период с 2021 г. по 2024 г.

Пункт 0808

По пункту 0808 наблюдения ведутся по 32 рабочим реперам. На рисунке 4 показан график вертикальных деформаций и изменения наблюдательных реперов по профильной линии 0808 за период с 2021 г. по 2024 г., т.к. данная профильная линия находится в зоне объекта исследования.

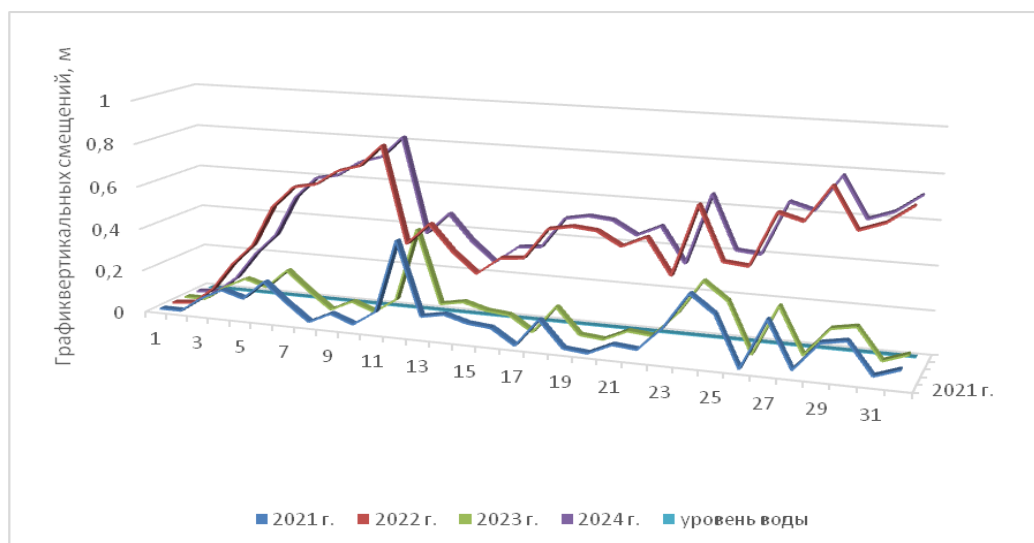


Рисунок 2.9 - График вертикальных деформаций наблюдательных реперов пункта 0808 за период с 2021 г. по 2024 г

Пункт Кожур

По пункту Кожур наблюдения ведутся по 2 рабочим реперам. На рисунке 4 показан график вертикальных деформаций и изменения наблюдательных реперов по профильной линии Кожур за период с 2021 г. по 2024 г., т.к. данная профильная линия находится в зоне объекта исследования.

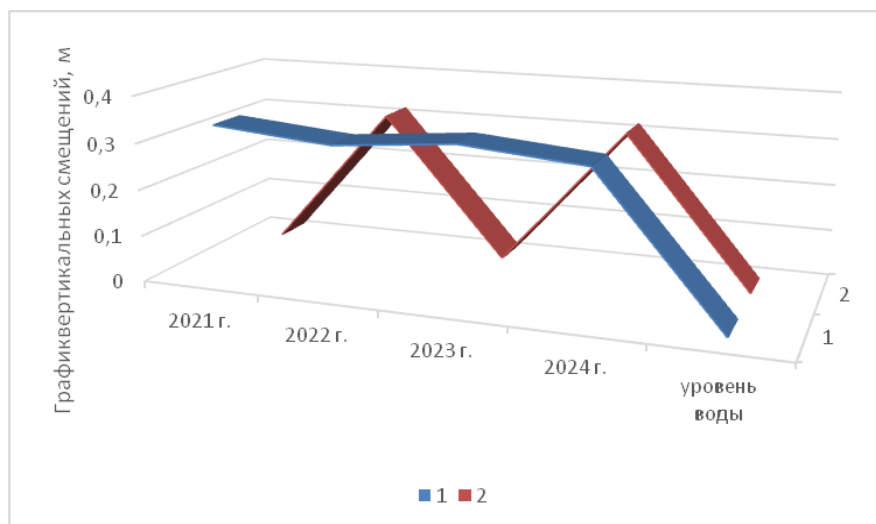


Рисунок 2.10 - График вертикальных деформаций наблюдательных реперов пункта Кожур за период с 2021 г. по 2024 г.

Уровень воды в Каспийском море в последние десятилетия стабильно снижается со скоростью в среднем *6–7 см в год*. Это обусловлено климатическими изменениями, снижением стока рек и усилением испарения. Понижение уровня моря приводит к уменьшению массы воды, что вызывает перераспределение нагрузок на земную кору и изменение локального гравитационного поля.

В результате этих процессов *высотные отметки пунктов нивелирования в городе Актау постепенно повышаются*. Ослабление гравитационного притяжения из-за снижения массы воды способствует незначительному поднятию земной поверхности. Дополнительно этому способствует изостатическая компенсация, когда кора постепенно поднимается в ответ на уменьшение давления. Таким образом, понижение уровня Каспийского моря напрямую связано с постепенным увеличением высот пунктов в Актау.

2.2 Дистанционное зондирование Земли

2.2.1 Обзор программного обеспечения для обработки данных ДЗЗ

Для обработки полученных данных на исследуемую территорию был использован комплекс программного продукта ArcGIS. Данный комплекс позволяет провести фотограмметрическую обработку данных дистанционного зондирования земли, а также выполнять дальнейший анализ

с использованием аналитических функций ГИС. Полная интеграция с ArcGIS позволяет провести быстрое преобразование пространственно-координированных растровых данных из одной картографической проекции в другую, выполнить трансформирование и координатную привязку изображения, конвертацию из растрового в векторный формат и наоборот [49, с. 23-31].

ArcGIS-это полноценная система, которая позволяет собирать, систематизировать, управлять, анализировать, обмениваться и распространять географическую информацию [50, 582-594]. Являясь мировым лидером среди платформ для создания и использования географических информационных систем (ГИС), ArcGIS представляет собой полную систему, позволяющую сбор, анализ, организацию, управление информацией.

Платформа ArcGIS позволяет любому пользователю публиковать географическую информацию для доступа и использования. Система доступна везде, где можно использовать веб-браузеры, мобильные устройства типа смартфонов, а также настольные компьютеры [51, с. 4-66.].

Пространственный анализ - самый интересный и замечательный компонент ГИС. Цель данного анализа заключается в получении новой информации из исходных данных для принятия лучших решений. Назначение символов данным и просмотр их на карте является формой анализа, в то время как карты изначально включают интерпретацию шаблонов и отношений, которые они представляют, пространственный анализ делает шаг вперед, применяя географические, статистические и математические операции к данным, применяемым к картам [52, с. 8-20].

Система ArcGIS включает в себя сотни аналитических инструментов и операций, используемых для решения многих проблем: от поиска объектов, соответствующих определенным критериям, до моделирования естественных процессов (например, потока воды через территорию) или использования пространственной статистики для определения информации, которую может предоставить набор точек о распределении явления [53, с. 238].

Институт исследования окружающей среды (ESRI), американская компания, получившая широкое применение во всем мире в области ГИС технологий. Основана в 1969 году, компания лидер в индустрии ГИС [54, с. 119].

В XX столетии отмечено два экстремальных явления уровня Каспийского моря, имеющие драматические последствия для населения прибрежных стран – аномально продолжительное падение уровня в период с 1930 по 1977 г. и вслед за этим аномально продолжительный подъем с 1978 по 1995 год. На графике 1 изображен уровень изменения воды [55, с. 288.]. Вследствие ненормального понижения и повышения уровня происходит эволюция водного объекта.

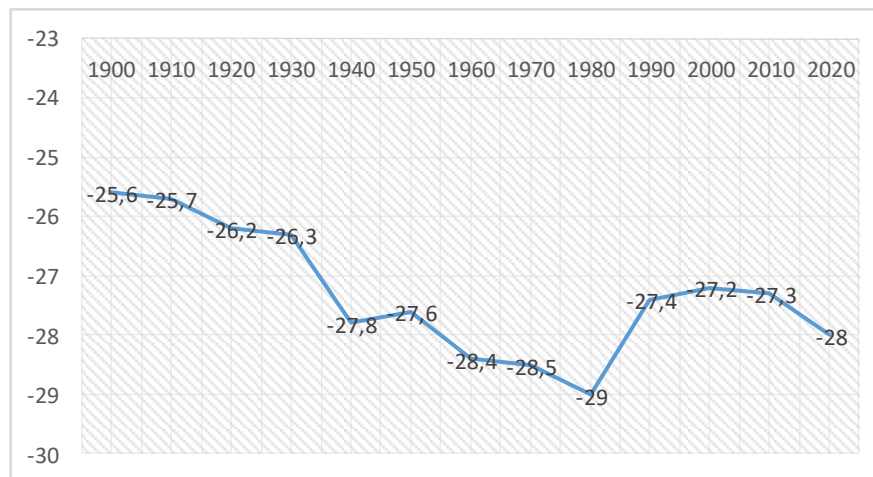


Рисунок. 2.11 - Многолетний ход среднегодового уровня Каспийского моря в XX и начале XXI в.

2.2 Исходные данные

Поиск водных объектов на основе многоспектральных изображений позволяет обнаруживать их по характеристикам отражательной способности природных объектов.

Водные объекты характеризуются самым низким значением коэффициента, среди других природных объектов. При этом все другие природные объекты даже находясь в состоянии увлажнения имеют больший коэффициент отражения. Данный факт применяется для обнаружения водных объектов на измеренном изображении [56, с. 105-108]. Снимки получены через сервис USGS Геологической службы США. Уровень обработки исходного многозонального космоснимка – L1. Такой уровень обработки снимков Landsat обеспечивает их радиометрическую и геометрическую коррекцию с использованием цифровых моделей рельефа (земная коррекция) [57, с. 9]. Выходная картографическая проекция UTM, координатная система отсчета WGS-84.

Для оценки точности использовались космические снимки Махаг, предоставленные компанией Digital Globe по запросу для научно-исследовательских целей. Компания Digital Globe - мировой лидер в производстве спутниковых оптических изображений и информацией [58, с. 62]. Разрешение снимков составляет 50см.

2.2.2 Характеристика космических снимков, полученных со спутника Landsat 8

Задачи оперативного спутникового контроля природных ресурсов, исследования динамики протекания природных процессов и явлений, анализа причин, прогнозирования возможных последствий и выбора способов предупреждения чрезвычайных ситуаций являются на современном этапе неотъемлемым атрибутом методологии сбора информации о состоянии интересующей территории (страны, края, города), необходимой для принятия правильных и своевременных управленческих решений [59, с. 5]. Программа

Landsat — наиболее продолжительный проект по получению спутниковых фотоснимков планеты Земля.

Программа Landsat – серия спутниковых миссий мониторинга Земли. Семейство спутников Landsat США совместно управляется NASA и Геологической службой США (USGS). С 1972 года серия спутников Landsat была запущена последовательно. Серия спутников Landsat предоставила временные данные для извлечения данных о береговой линии и мониторинга изменений за последние десятилетия [60, с. 11-21].

Сведения, обработанные системой Landsat, позволяют решать ряд большого числа тематических задач, включая, например, измерение протяженности и классификация растительного покрова, геологическое картирование, контроль эрозии почв в береговой зоне и др. [61, 19-22]. Наиболее актуальные спутниковые данные получают со спутника Landsat 8, американского спутника дистанционного зондирования Земли, восьмого в рамках программы Landsat (седьмой выведенный на орбиту). Изначально назывался Landsat Data Continuity Mission (LDCM), создан совместно NASA и USGS. Выведен на орбиту 11 февраля 2013 года. [59, с. 5]. Средства Landsat 8 являются эволюционным прогрессом в технологии. OLI EO-1 совершенствует передние датчики, с использованием технического подхода, указанного датчиком, установленном на спутнике NASA [62, 154-172].

Источник космических снимков – свободные геоданные USGS на сайте <http://www.usgs.gov/> и <http://www.glovis.usgs.gov/>.

Для исследования нами использовались снимки Landsat 4,5,8 TM: многозональный (архивированный набор изображений в формате GeoTIFF) и синтезированный снимок в натуральных цветах в формате JPEG с координатной привязкой, разрешение снимков 30 м. Период с 1990 по 2021 года - август месяц, с минимальным содержанием облачности (< 5%) или безоблачные.

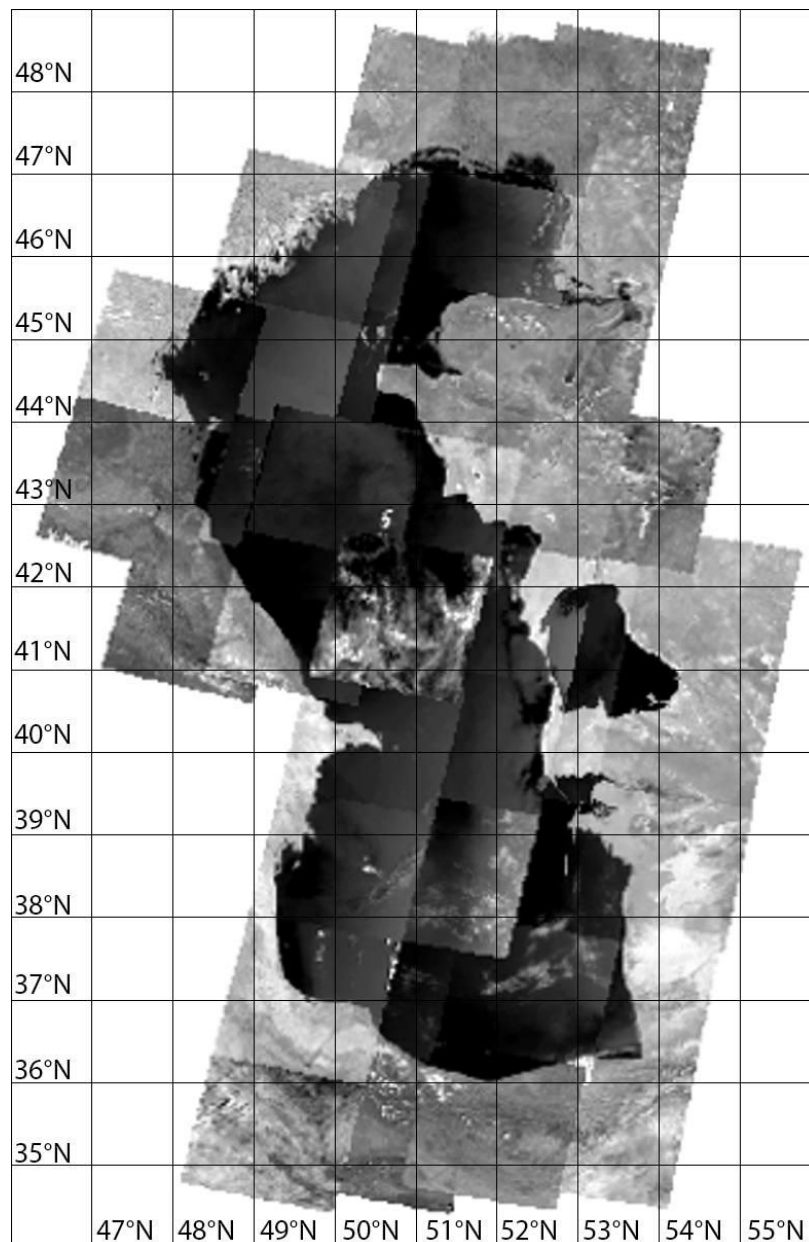


Рисунок 2.12 – Мозайка космических снимков Landsat на территорию исследования за 2008 год

Параметры продукции Landsat 8:

- Уровень обработки: 1T (коррекция рельефа)
- Формат изображений: GeoTIFF
- Размер пикселя: 15 метров/30 метров/100 метров (панхроматический канал/ мультиспектральный канал/ дальний ИК)
- Проекция: UTM, также полярная стереографическая для Антарктиды
- Система координат: WGS 84.

Таблица 2.2 - Спектральных диапазонов Landsat 8

Номер канала	Спектральный канал	Длины волн	Разрешение
Канал 1	Побережья и аэрозоли	0.433 — 0.453 мкм	30 м
Канал 2	Синий	0.450 — 0.515 мкм	30 м
Канал 3	Зеленый	0.525 — 0.600 мкм	30 м
Канал 4	Красный	0.630 — 0.680 мкм	30 м
Канал 5	Ближний ИК	0.845 — 0.885 мкм	30 м
Канал 6	Ближний ИК	1.560 — 1.660 мкм	30 м
Канал 7	Ближний ИК	2.100 — 2.300 мкм	30 м
Канал 8	Панхроматический	0.500 — 0.680 мкм	15 м
Канал 9	Перистые облака	1.360—1.390 мкм	30 м
Канал 10,11	Тепловое ИК	11000-13000 мкм	30 м

Использование данных спектральных каналов позволяет подобрать необходимые комбинации цветов, для проведения процесса автоматизированного дешифрирования космических снимков, с целью распознавания объектов на местности [63, с. 191].

2.2.3 Мониторинг береговой линии Казахстанского побережье по данным космических снимков

1. Методика выделения водных объектов

Диапазон измеряемых электромагнитных волн варьирует от 10^{-10} м (коротковолновое космическое излучение) до 10^{10} метров (радиоволны). Возможность идентификации и классификации объектов основывается на том, что объекты разных типов — горные породы, почвы, водные поверхности, растительность и т. д., по-разному отражают и поглощают электромагнитное излучение в том или ином диапазоне длин волн [64, с. 21-32]. Для исследования нами были использованы многоканальные снимки, сделанные американским спутником Landsat, который имеет 11 каналов съемки с разными диапазонами длин волн (табл. 1) [63, с. 191].

Особенность многоканальных снимков заключается в том, что зная особенности волновых характеристик каналов и их комбинаций, можно получить интересующую нас информацию о свойствах различных

географических и экологических объектов. Однако, для разных моделей спутников Landsat комбинации каналов не одинаковы, что связано с усовершенствованием и доработкой каждого последующего запущенного аппарата. Так как все получаемые данные со спутника являются мультиспектральными изображениями, для получения заложенной в них информации необходимо интерпретировать и обработать полученные данные и показать их физический смысл. Этап анализа данных ДЗЗ, главной задачей которого является распознавание и идентификация объектов, обнаруженных на снимке, называется дешифровкой изображения [64, с. 21-32].

При проведении обработки мультиспектрального снимка часто выполняют преобразования, которые строят «индексные» изображения [65, с.159 – 173].

На основе математических данных с матрицами значений яркости в определенных каналах создают растровое изображение, значениям пикселей присваивается «спектральный индекс». [66, с. 84] На готовой основе полученного изображения проводили дальнейшее исследование.

Процесс поиска водных объектов на основе набора измеренных многоспектральных изображений позволяет обнаруживать их по характеристикам отражательной способности природных объектов [6–8] (см. рис. 1). [49, с. 23-31]. Водные объекты характеризуются самыми низкими значениями коэффициентов отражения среди других природных объектов. При этом все другие природные объекты даже в состоянии увлажнения имеют больший коэффициент отражения [67, с. 75-83]. Этот факт используется при обнаружении водных объектов на измеренном изображении.

Для обнаружения водных объектов по космическим данным широко используются следующие индексы: NDWI, NDMI, MNDWI, WRI, NDVI. (таблица 1)

Таблица 2.3 - Многоспектральные индексы, используемые для определения водных объектов

№	ИНДЕКС	ФОРМУЛА РАСЧЕТА	ДИАПАЗОН ЗНАЧЕНИЙ
1	Normalized Difference Water Index	$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$	Вода имеет положительное значение
2	Normalized Difference Moisture Index	$NDMI = (NIR - MIR) / (NIR + MIR)$	Вода имеет положительное значение
3	Modified Normalized Difference Water Index	$MNDWI = (GREEN - MIR) / (GREEN + MIR)$	Вода имеет положительное значение
4	Water Ratio Index	$WRI = (GREEN + RED) / (NIR + MIR)$	Вода имеет значение больше 1
5	Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$	Вода имеет отрицательное значение

NDWI (Normalized Difference Water Index) Индекс может эффективно выделить информацию о водоеме и устранить шум почвы и поверхностной растительности [68, с. 33-38]. В практических исследованиях исследуемая

область часто охватывает различные формы рельефа, включая пляжи, приливные отмели и коренные породы. Индекс NDWI был предложен Макфитерсом в 1996 году. На сегодняшний день индекс позиционируется для детектирования и мониторинга малейших изменений в содержании водных объектов. Используя преимущества спектральных диапазонов NIR (ближний инфракрасный) и GREEN (видимый зеленый), NDWI может усилить присутствие водных объектов на спутниковом снимке. [69, 3025-3033]. Недостатком данного индекса является чувствительность к строительным конструкциям, которая может приводить к переоценке водных объектов [49, с. 23-31].

Поскольку индекс NDWI (Нормализованный разностный водный индекс) эффективно определяет содержание влаги, его часто путают с индексом NDMI, также известным как NDWI GAO [56, с. 105-108]. На самом деле, это разные индексы с уникальными формулами расчета и сферой применения. NDMI использует комбинацию NIR-SWIR (ближний инфракрасный и коротковолновый) для усиления присутствия влаги в листьях растений. NDWI рассчитывается с использованием комбинации GREEN-NIR (видимый зеленый и ближний инфракрасный), что позволяет выявлять незначительные изменения содержания воды в водоемах [70, 1307-1317].

Нормализованный разностный водный индекс (NDWI) был изменен путем замены среднего инфракрасного диапазона, такого как полоса 5 Landsat TM, на ближний инфракрасный диапазон, используемый в NDWI. Модифицированный NDWI (MNDWI) может улучшать характеристики открытой воды, эффективно подавляя и даже удаляя застроенный наземный шум, а также шум растительности и почвы. Усовершенствованная информация о воде с использованием NDWI часто смешивается с застроенным земельным шумом, и поэтому площадь извлеченной воды переоценивается [71]. Соответственно, MNDWI больше подходит для улучшения и извлечения информации о воде для водного региона с фоном, в котором преобладают застроенные участки земли, из-за его преимущества в снижении и даже удалении шума застроенной земли по сравнению с NDWI [49, с. 23-31].

Из-за доминирующих спектральных характеристик зеленой и красной полос по сравнению с полосами NIR и MIR индекс водного фактора (WRI) показывает значения выше 1 для воды. Помимо индексов воды, для выделения характеристик воды можно использовать и некоторые другие индексы; Примером таких индексов является нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) (43), который показывает уникальное отрицательное значение (10).

2.4 Результаты полученной обработки, оценка точности

Значения для индексов NDWI, NDMI, MNDWI, WRI, NDVI лежат в диапазонах $[-1; 1]$. В табл. 1 указаны диапазоны значений, при которых

пиксель с наибольшей вероятностью связан с водным объектом. Для каждого индекса строились фильтры на основе учета диапазона значений, указанных выше индексов, позволяющих выделять водные объекты (бинаризация изображений: 0 – неводные объекты и 1 – водные объекты). Проводилось сравнение водных масок для каждого фильтра с эталонной маской водного объекта. Эталонная водная маска с разрешением 50 см была построена по космическим снимкам компании Maxar Technologies.

Оценка точности обнаружения водных объектов получена путем деления суммы, верно классифицированных пикселей водного объекта, полученного с помощью водного индекса, к общему числу пикселей эталонной маски:

$$O = 100 \times |N_w - N_{wm}| / N_{wm}, \% \quad (1)$$

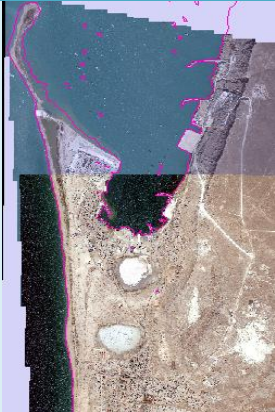
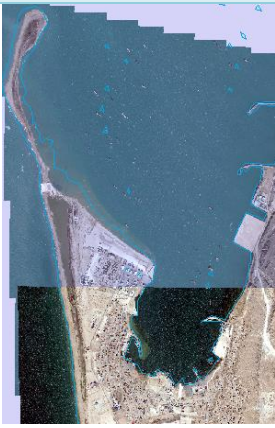
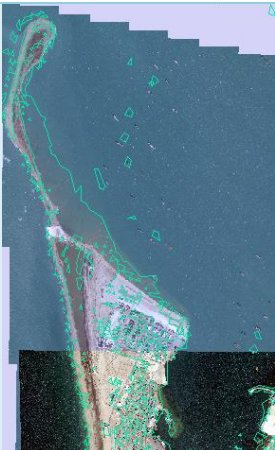
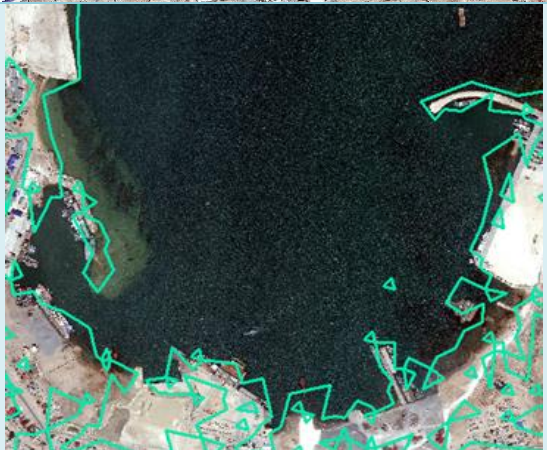
Здесь N_w – число водных пикселей анализируемого изображения и N_{wm} – число водных пикселей эталонной маски.

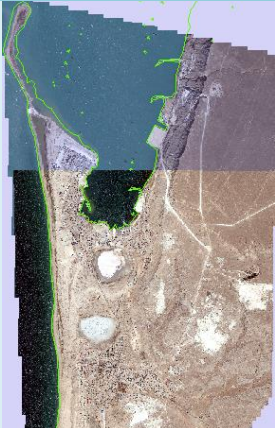
Таблица 2.4 - Точность выделения водных объектов для водных индексов.

Название метода	Диапазон	Общая точность %
<i>WRI</i>	>1.0	86.5%
<i>NDWI</i>	>0.0	86.2%
	>0.18	87.2%
<i>MNDWI</i>	>0.0	86.2%
	>0.18	88.2%
<i>NDVI</i>	-0.45... - 0.25	87.2%
	<0.0	86.2%
<i>NDMI</i>	>0.0	85.2%
	>0.14	86.0%

Полученные результаты В табл. 2 приведены результаты оценки точности выделения водных объектов для водных индексов WRI, NDWI, NDMI, MNDWI, NDVI. Видно, что точность обнаружения водных объектов высокая и максимально близкая к эталонной маске. Для некоторых индексов были проведены дополнительные расчеты, учитывая различные варианты диапазонов значений принадлежности пикселей к водным объектам. Это позволило более точно найти пороги значений, при которых пиксель можно считать принадлежащим водным объектам [56, с. 105-108].

Таблица 2.5 Визуализация Маски водных объектов, рассчитанных по 30 м снимкам, в сравнении с эталонными снимками разрешения 50 см

Индекс		Изображение береговой линии		Увеличенный фрагмент	
1	NDVI				
2	WRI				
3	NDMI				

4	MNDWI		
5	NDWI		

Видно, что точность обнаружения водных объектов высокая и максимально близкая к эталонной маске.

Проверка адекватности методик дешифрирования показала, что наилучшим способом распознавания водных поверхностей для Каспийского моря является вычисление индекса MNDWI, имеющего минимальную величину среднеквадратической ошибки [49, с. 23-31]. В дальнейшем исследовании динамики изменения береговой линии проводилось с использованием этого индекса. Для выявления временной изменчивости площадей водного зеркала проанализировано по 44 снимка на каждый выбранный год (в общей сложности 220 снимков). Данный индекс был использован для расчета береговой линии Каспийского моря за период с 1990-2021гг.

Для расчета береговой линии Каспийского моря на каждый год исследования были составлены мозаики из 44 снимков. В целях ускорения процесса обработки большого количества снимков был использован процесс геомоделирования в ПО ArcGIS.

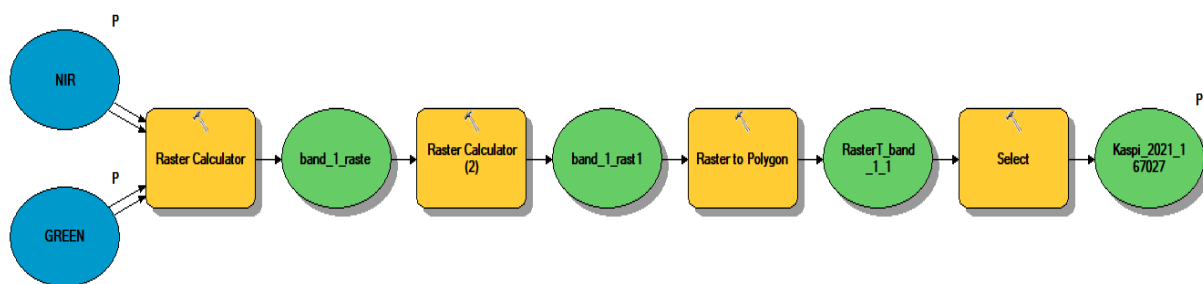


Рисунок 2.13 – Геомоделирование процесса вычисления

ModelBuilder предназначен для создания моделей и инструментов моделей. Модель – это последовательность взаимосвязанных инструментов и данных, результаты работы одного инструмента поступают на вход другого.

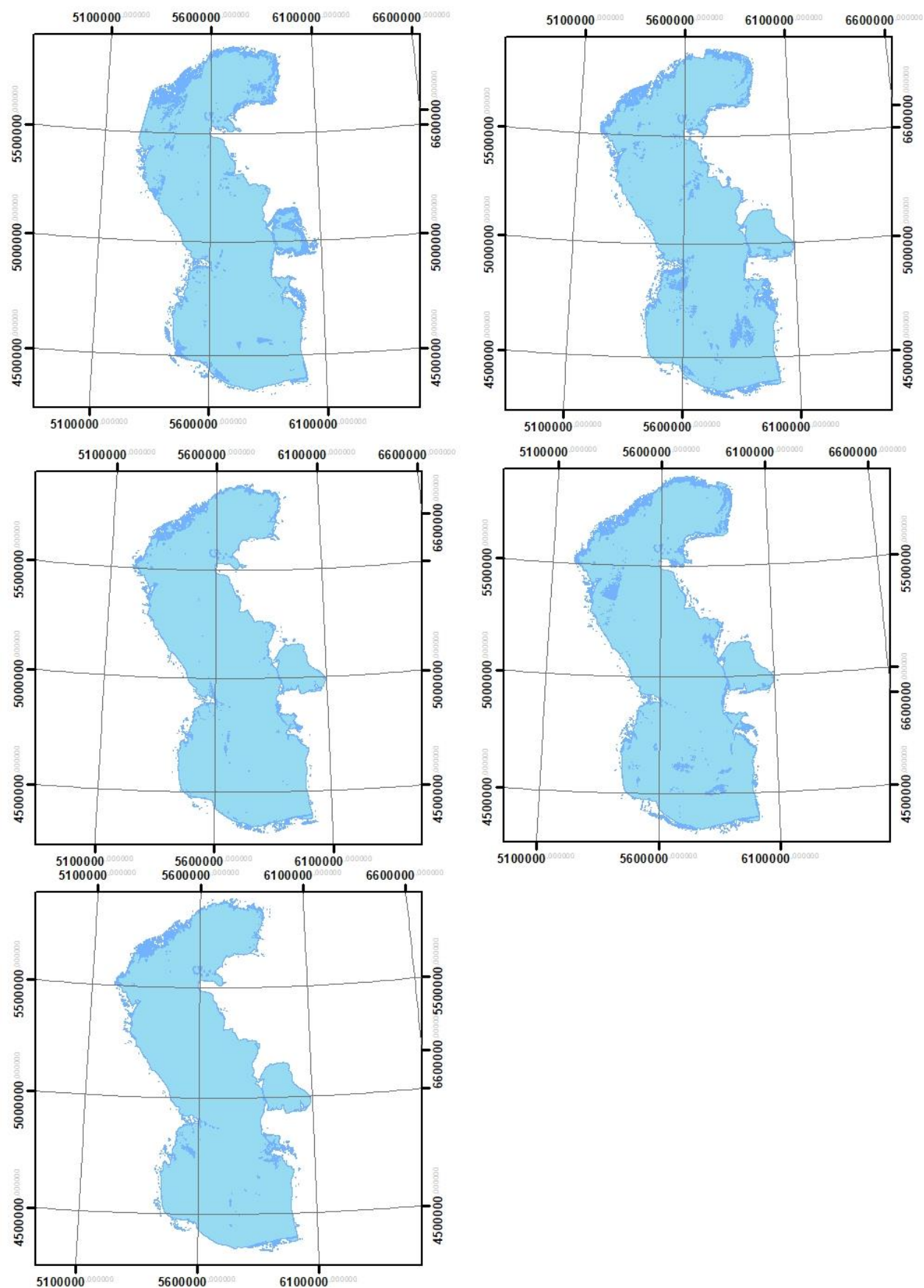


Рисунок 2.14 - Расчет индексов с космического летательного аппарата Landsat 8, разрешение снимков 30 метров.

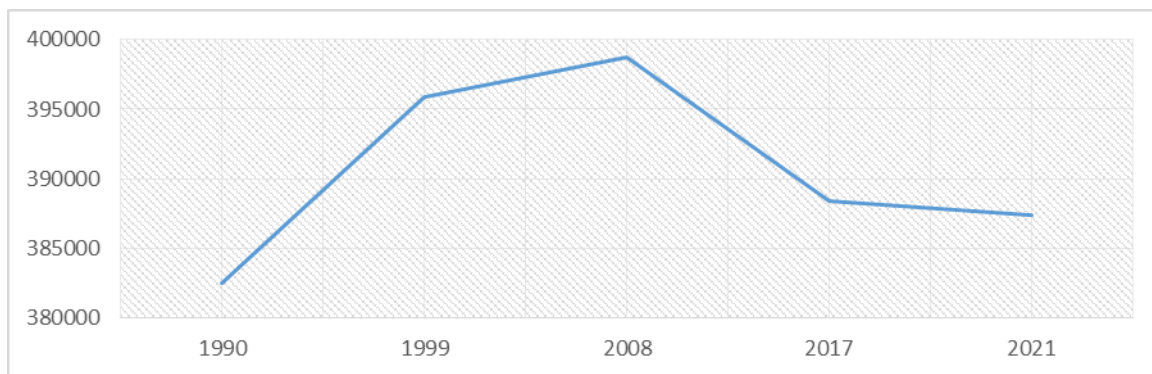


Рисунок 2.15 – изменение объема Каспийского моря за период с 1990 по 2021 гг.

Временные ряды площади водного зеркала Каспийского моря позволяет выделить периоды повышения и убывания водности. В последние годы колебания уровня Каспийского моря обусловлены соотношением характеристик водного баланса, изменяющихся под влиянием антропогенного изменения климата.

Таким образом, резюмируя, можно отметить, что понижение и повышение уровня Каспийского наблюдалось и в прошлом, и оно имеет долговременный природный циклический характер. В последние годы на состояние Каспия стало влиять и глобальные изменения климата, как изображено на рисунке 2.15.

2.5 Анализ результатов с наземными инструментальными наблюдениями

Анализ результатов наблюдений за деформациями земной поверхности по существующим профильным линиям показал, что территория, для которой производится нивелирование не полностью охватывают всю поверхность объекта. В связи с этим, возникает необходимость построения дополнительных профильных линий для поддержания эффективности мониторинга.

Однако, построение дополнительных профильных линий с закладкой новых наблюдательных станций, организация и проведение на них высокоточного нивелирования в разы увеличивает затраты на мониторинг. Поэтому на земной поверхности объекта исследования необходимо проводить следующие методы мониторинга: радарную интерферометрию, GPS измерения и т.д. для повышения эффективности и безопасного ведения работ.

По данным экспертов, в период с 2006 по 2020 гг. на акваторию Каспийского моря выпадало наименьшее количество осадков, а процессы испарения были более интенсивные. К тому же, из-за серии маловодных лет в бассейне реки Волга, средний приток воды также был наименьшим. Главная причина этой маловодности – потепление климата, охватившее все северное полушарие [72, с. 68-90].

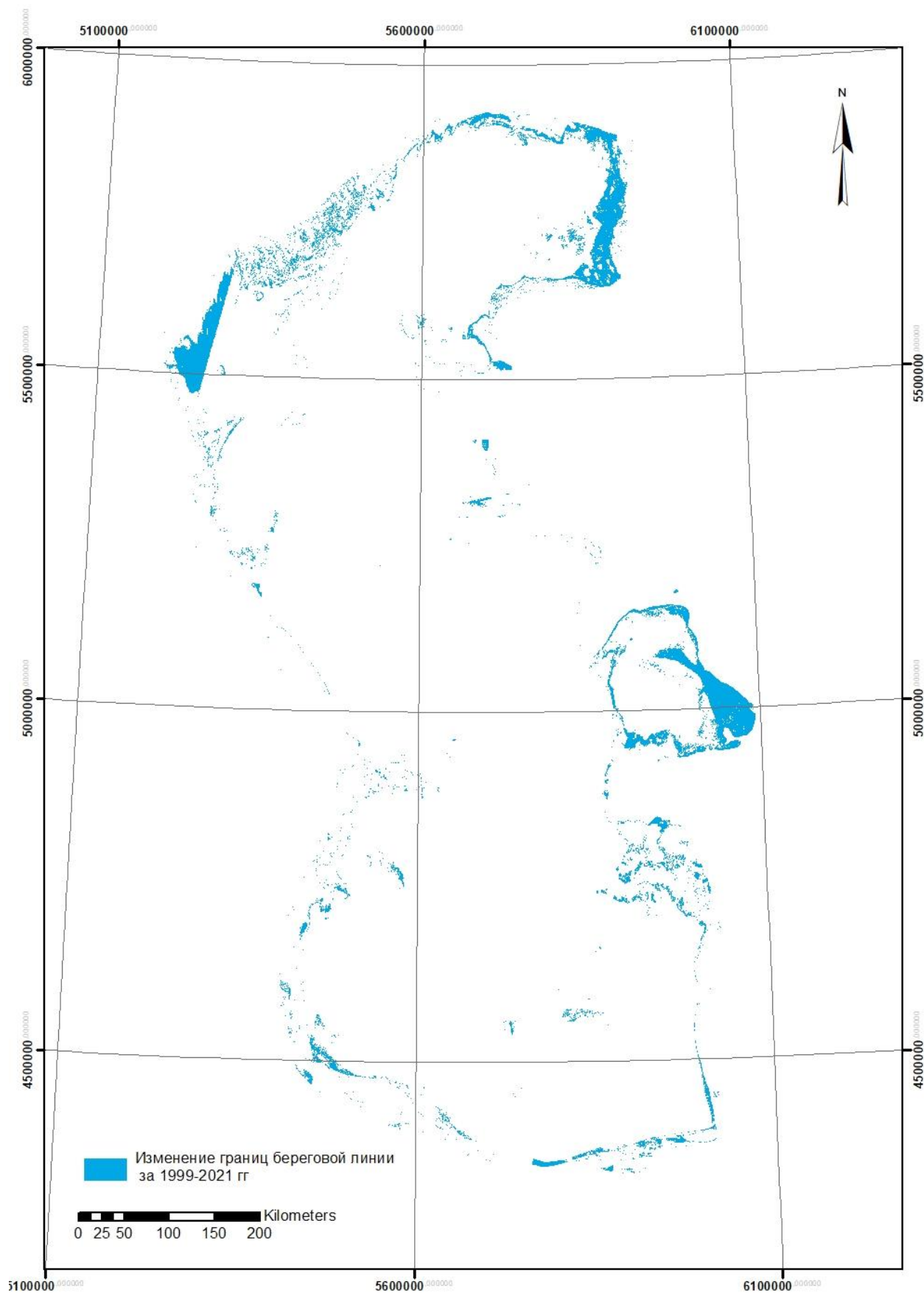


Рисунок 2.16 - Изменение границ Каспийского моря за период с 1990 по 2021 год

2.6 Выводы по главе

Подводя итог второй главы диссертационной работы, необходимо отметить, Проведенный сравнительный анализ композитных индексов. Фильтры на основе этого параметра создают возможность идентификации водных поверхностей (рек, озер, искусственных водоемов) на земной проекции. Перед расчетом индексов были выполнены радиометрическая и атмосферная коррекции с учетом условий съемки и корректировки яркостного интервала полученного изображения.

В результате обработки данных получен вывод, что наилучшим водным индексом среди WRI, HDMI, NDWI и DVI является MNDWI, что свидетельствует о визуальном анализе масок воды и высокой оценке точности. В этом случае также приведены сравнения масок воды для каждого индекса.

Мониторинг береговой линии, упомянутый в данном наблюдении, предоставленный фотограмметрическим методом, имеет соответствующее качество, так как данные охватывают всю необходимую территорию и корректно передают информацию о водном ресурсе. Кроме того, цифровая фотограмметрическая технология является одним из наиболее эффективных способов предоставления точных данных.

Кроме того, реализация этих методов позволяет существенно сократить и упростить различные виды традиционных геодезических и картографических измерений. На этой основе использование полученных данных позволит повысить точность данных, сократить сроки получения необходимых материалов и снизить себестоимость продукции.

Данный метод интерпретируется пользователем для получения выходных материалов как в графическом, так и в цифровом виде. Использование ГИС-технологий для сбора и хранения полученной информации в единой базе данных позволяет оперативно проводить пространственный анализ всей исследуемой территории. Обмен данными с использованием глобальных и локальных сетей обеспечивает эффективную организацию и управление работами на объектах, а также дает возможность выполнять экологическое прогнозирование и оценку окружающей территории.

3 ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

1.1 Обзор методов искусственного интеллекта для анализа изменений береговой линии

Мониторинг изменений береговой линии Каспийского моря имеет чрезвычайно важное значение для экологических, экономических и социальных аспектов развития прикаспийских государств. Традиционные методы мониторинга, такие как полевые исследования и использование стандартных ГИС-технологий, часто требуют значительных ресурсов, времени и не всегда позволяют получить оперативную и точную информацию [73, с. 192].

В последние годы технологии искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения получили широкое распространение в различных областях, включая дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и анализ геопространственных данных [74, с. 196-219]. Применение ИИ в задачах анализа изменений береговой линии предоставляет новые возможности для автоматизации процесса обработки данных, повышения точности и оперативности получаемой информации [75].

В данной главе рассматриваются современные технологии ИИ, используемые для анализа изменений береговой линии Каспийского моря, приводятся примеры их применения, а также выполняется анализ экономических затрат при использовании ИИ по сравнению с традиционными методами.

Машинное обучение и его применение. Машинное обучение представляет собой область ИИ, фокусирующуюся на разработке алгоритмов, способных обучаться на данных и принимать решения с определенной степенью автономии [74, с. 196-219]. В контексте анализа изображений ДЗЗ, машинное обучение позволяет автоматизировать процессы классификации и сегментации, что ускоряет и упрощает обнаружение изменений береговой линии [76, с. 263].

Применение методов машинного обучения, таких как деревья решений, случайные леса и метод опорных векторов, обеспечивает эффективное извлечение характеристик из спутниковых изображений для идентификации водных объектов и изменений в береговой зоне [77, с. 350].

Глубокое обучение. Глубокое обучение, являясь подмножеством машинного обучения, использует многослойные нейронные сети для анализа сложных данных. Конволюционные Нейронные Сети (КНС, Convolutional Neural Network - CNN) особенно эффективны для обработки изображений и широко применяются в задачах сегментации и классификации [78, 527-560].

В задачах анализа береговой линии КНС позволяют автоматически выделять границы между водой и сушей на спутниковых изображениях

высокого разрешения, обеспечивая высокую точность и производительность. [79].

Обработка изображений с помощью ИИ. Технологии ИИ позволяют эффективно обрабатывать большие объемы данных ДЗЗ, включая мультиспектральные и гиперспектральные изображения. [80, с. 163]. Методы обработки изображений, такие как кластеризация, сегментация и обнаружение контуров, улучшают точность определения изменений береговой линии во времени.

1.2 Применение ИИ для анализа изменений береговой линии Каспийского моря

3.3.1 Использование данных ДЗЗ и изображений высокого разрешения

Современные спутниковые системы, такие как Sentinel и Landsat, предоставляют данные с высоким пространственным и временным разрешением, что является базой для применения ИИ-алгоритмов. Использование данных ДЗЗ в сочетании с методами ИИ позволяет мониторить изменения береговой линии с высокой точностью и регулярностью.

3.3.2 Примеры алгоритмов и моделей

– *Сегментация береговой линии с помощью КНС:* Модель U-Net широко используется для сегментации изображений в медицине и успешно адаптирована для задач дистанционного зондирования, включая выделение береговой линии [81, с. 1-14]. Она позволяет выделять участки воды и суши с высокой точностью, даже на сложных участках побережья.

– *Классификация на основе случайных лесов:* Этот метод машинного обучения позволяет автоматически классифицировать пиксели изображения, относя их к определенным классам (вода, растительность, урбанизированные территории и т.д.) [82, с. 75-86]. Случайные леса показали высокую эффективность в обработке данных ДЗЗ.

3.3.3 Примеры выполненных исследований и их результаты

– *Исследование изменений береговой линии Каспийского моря с использованием глубокого обучения:* - применен метод глубокого обучения для анализа спутниковых изображений Каспийского моря, что позволило обнаружить и количественно оценить изменения береговой линии за последние 20 лет [6](#). Результаты исследований показали высокую точность и эффективность предложенного подхода.

– *Мониторинг изменений уровня воды и береговой линии:* Исследования - демонстрируют, что применение ИИ-методов позволяет более оперативно и точно отслеживать динамику изменений уровня воды в Каспийском море и связанных с этим изменений береговой линии.

Мониторинг изменений береговой линии с использованием спутниковых изображений Landsat

Для сегментации береговой линии применена нейронная сеть U-Net, адаптированная для анализа снимков с низким разрешением. Проведена предварительная обработка изображений: устранение облачности, корректировка атмосферных и геометрических искажений. Данные классифицированы на "воду" и "сушу", что позволило выделить границу моря [83, с. 1-22].

В северной части (дельта реки Волги) наблюдается сокращение площади береговой линии на 15% за последние 40 лет из-за снижения уровня моря [84, с. 19]. В южной части моря, напротив, зафиксировано наступление воды на 10-15 м вглубь суши на отдельных участках [85, с. 20]. Предложено использование моделей прогнозирования для оценки дальнейшего сокращения береговой линии.

Результаты исследования рекомендованы для планирования инженерной защиты и адаптации инфраструктуры прибрежных территорий.

Прогнозирование уровня Каспийского моря с использованием временных рядов. Временные ряды данных об уровне моря, осадках, температуре воздуха и скорости ветра собраны из открытых источников (NOAA, гидрологические станции). Использована модель LSTM (Long Short-Term Memory) для анализа временной зависимости и прогнозирования уровня воды. Проведено тестирование модели на исторических данных (1980–2023). Прогноз позволил разработать стратегию предотвращения негативного влияния на биоразнообразие и инфраструктуру.

Выявление антропогенных изменений с помощью глубокого обучения. При этом были использованы снимки с высоким разрешением (Sentinel-2 и PlanetScope) для анализа изменений на отдельных участках побережья. Обучена сверточная нейронная сеть (CNN) для классификации объектов: порты, нефтяные платформы, плотины. Проведен анализ корреляции между инфраструктурными изменениями и динамикой береговой линии.

Обнаружено, что вблизи крупных портов и нефтедобывающих районов (например, Актау, Туркменбаши) береговая линия подвергается локальной эрозии. Возведение плотин в бассейне реки Волга стало причиной сокращения притока пресной воды, что усилило обмеление северной части моря. Рекомендовано внедрение более экологических технологий для снижения нагрузки на экосистему.

Классификация экосистем прибрежных районов с использованием DeepLab. Использованы спутниковые изображения Sentinel-1 и Sentinel-2, а также дополнительные данные о типах растительности. Применена модель DeepLab для классификации типов растительности (тростник, камыш, кустарники). Сравнены данные за 1990-е годы и 2021-е для выявления динамики. В северной части моря произошло сокращение площади водно-болотных угодий на 20% из-за обмеления. В южной части наблюдалось увеличение солончаков, что негативно влияет на биоразнообразие. Рекомендовано проводить регулярный мониторинг с использованием

спутников для предотвращения деградации экосистем. Эти подходы подчеркивают важность интеграции современных технологий для управления прибрежными зонами и устойчивого развития региона.

1.3 Сравнительный анализ экономических затрат использования ИИ и традиционных методов

Традиционные методы мониторинга береговой линии включают в себя:

- *Полевые исследования:* Выездные работы с использованием инструментальных измерений требуют значительных затрат на персонал, оборудование, транспорт и время. Стоимость таких работ может достигать нескольких тысяч долларов за один выезд. Также существует ограничение по частоте и масштабу исследований из-за трудоемкости и затратности процесса.

- *Традиционные ГИС-методы:* Анализ данных в ГИС с использованием ручной оцифровки береговой линии на основе имеющихся карт, аэрофотоснимков или спутниковых изображений. Этот процесс является трудоемким, требует квалифицированных специалистов и значительного времени, что увеличивает затраты.

Использование технологий ИИ в анализе изменений береговой линии включает в себя следующие затраты:

- *Разработка и обучение моделей:* Первоначальные инвестиции в разработку ИИ-моделей, включая затраты на вычислительные ресурсы и специалистов по машинному обучению. Однако после первоначальной настройки модели она может применяться повторно для обработки новых данных с минимальными дополнительными затратами.

- *Обработка больших объемов данных:* Современные облачные сервисы и высокопроизводительные вычислительные мощности позволяют обрабатывать большие объемы данных ДЗЗ эффективнее и дешевле, чем при традиционных методах. Стоимость аренды облачных ресурсов снижается, что делает данный подход более экономически эффективным.

- *Использование открытых данных:* Наличие бесплатных данных ДЗЗ от таких программ, как Landsat и Sentinel, значительно сокращает расходы на приобретение новых данных.

Сравнительный анализ показывает, что использование ИИ-технологий может существенно снизить общие экономические затраты на мониторинг береговой линии по сравнению с традиционными методами. Основные преимущества:

- *Сокращение времени обработки:* Автоматизация процессов с помощью ИИ уменьшает время, необходимое для анализа данных, в несколько раз. Это особенно важно при необходимости оперативного реагирования на изменения.

- *Снижение трудозатрат:* Меньшая потребность в ручном труде и полевых работах снижает расходы на персонал и логистику.

– *Повышение точности и обновляемости данных:* Регулярный мониторинг с использованием ИИ и данных ДЗЗ обеспечивает более актуальную и точную информацию, что способствует принятию своевременных решений.

– *Масштабируемость:* ИИ-решения легко масштабируются на большие территории без существенного увеличения затрат, что невозможно при традиционных подходах.

Однако следует отметить, что начальные инвестиции в разработку и внедрение ИИ-технологий могут быть выше, чем затраты на традиционные методы. Тем не менее, в долгосрочной перспективе экономия становится более ощутимой благодаря снижению переменных расходов и возможности повторного использования разработанных моделей.

Временные ряды площади водного объекта Каспийского моря позволяют выделить периоды увеличения и уменьшения его значимости. В последние годы флуктуации уровня Каспийского моря обусловлены соотношением характеристик водного баланса, изменяющегося под влиянием антропогенных изменений климата.

Оценка выявила значительные колебания уровня прибрежной зоны Каспийского моря в крупных населённых пунктах, таких как Актау, Атырау и Форт-Шевченко, за период исследования. Анализ показал, что изменения уровня моря характеризуются пространственно-временными вариациями, вызванными такими факторами, как климатическая изменчивость, процессы осадконакопления и антропогенное воздействие. Полученные результаты предоставляют ценные сведения о долгосрочных тенденциях и динамике прибрежной зоны Каспийского моря, что позволяет лучше понять экологические процессы и их последствия.

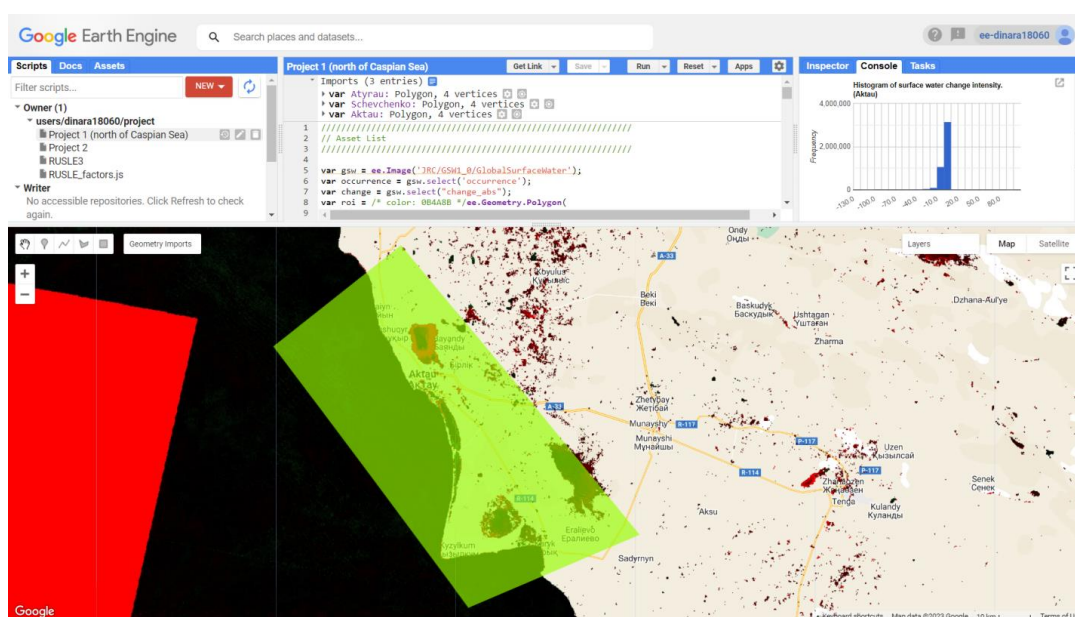


Рисунок 3.1 -Интенсивность изменения поверхностных вод в регионе Актау Каспийского моря. Примечание: Красный/зеленый цвет указывает на уменьшение/увеличение появления поверхностных вод между эпохами.

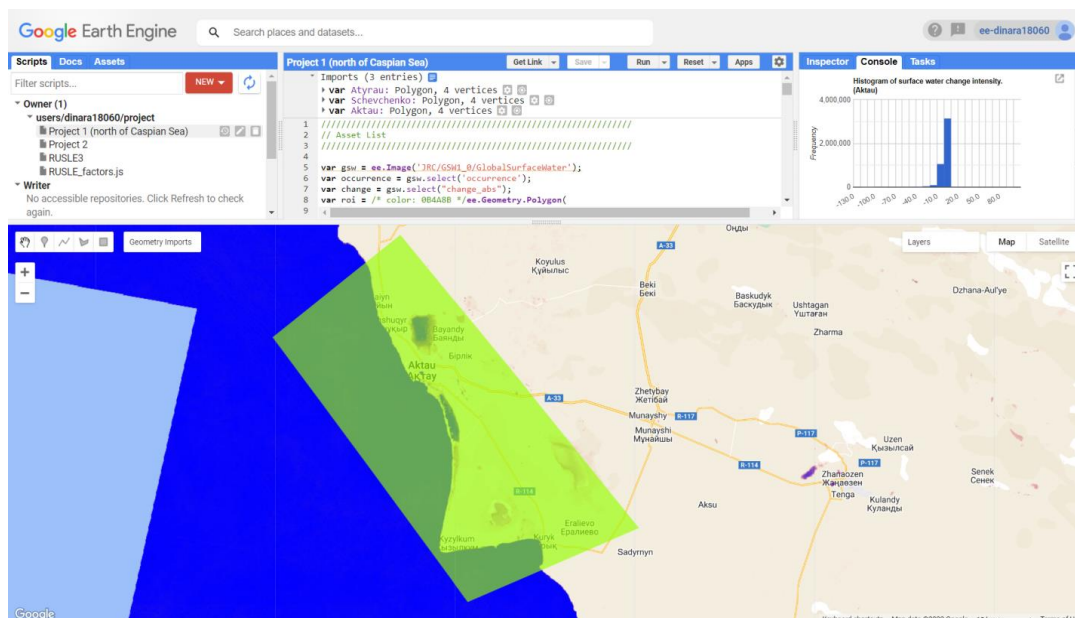


Рисунок 3.2 - Снимок экрана распределения появления воды в регионе Актау Каспийского моря, с использованием прозрачного красного цвета для минимального значения (0%) и насыщенного синего цвета для максимального значения.

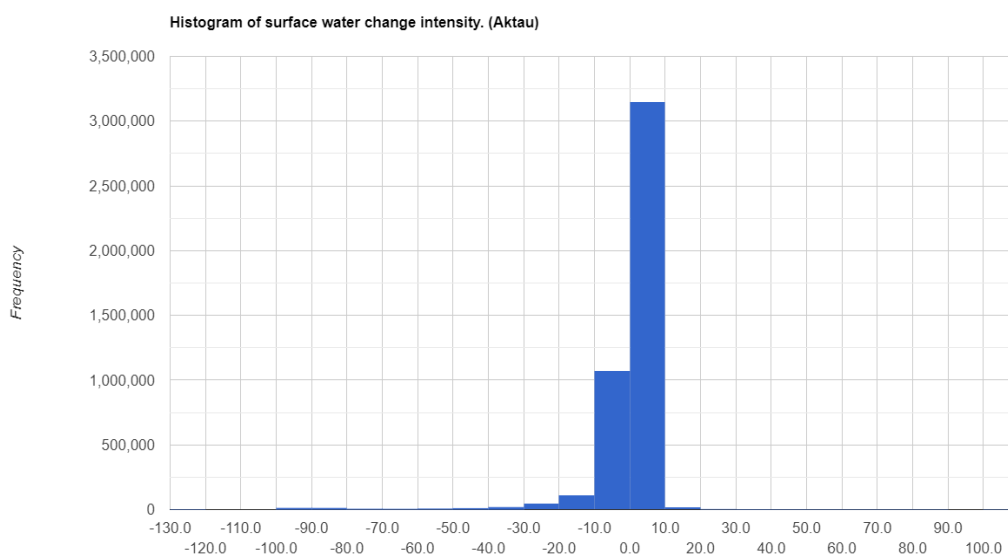


Рисунок 3.3 - Результаты вкладки консоли, отображающие гистограмму интенсивности изменения поверхностных вод Каспийского моря в регионе Актау.

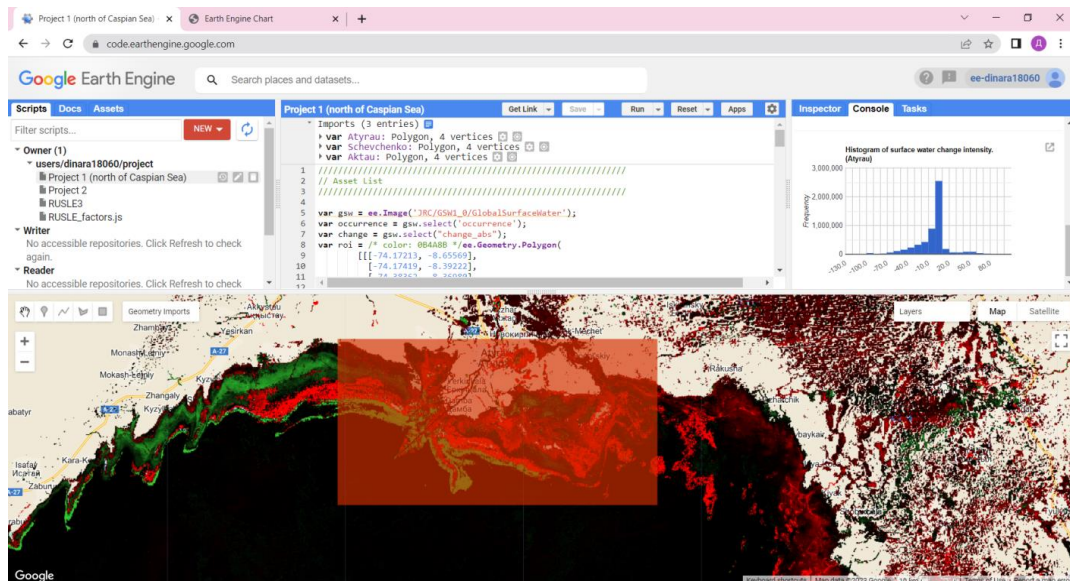


Рисунок 3.4 - Интенсивность изменения поверхностных вод в регионе Атырау. Примечание: Красный/зеленый цвет указывает на уменьшение/увеличение появления поверхностных вод между эпохами.

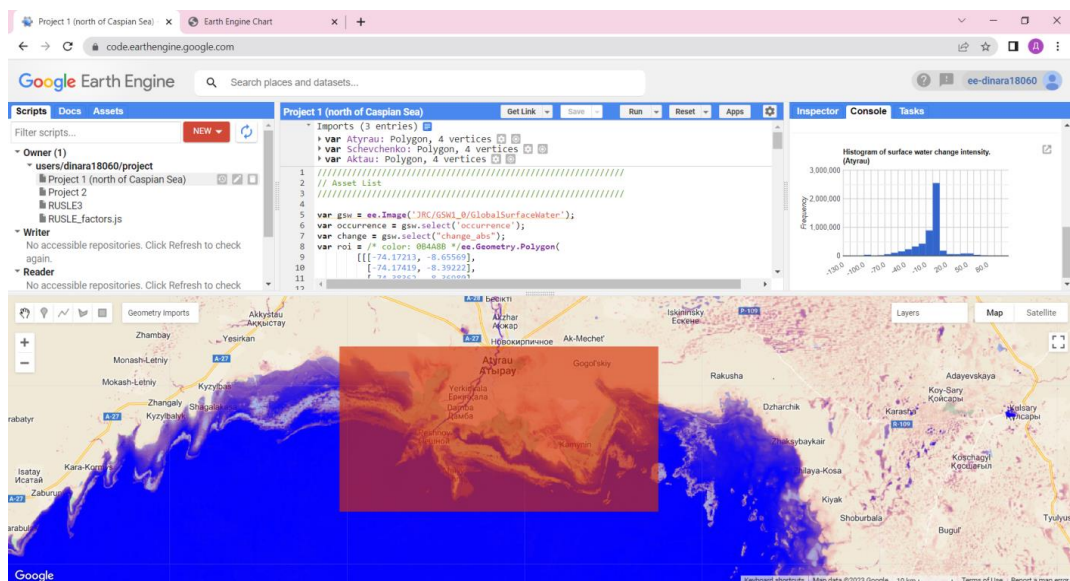


Рисунок 3.5 - Снимок экрана распределения появления воды в регионе Актау Каспийского моря, с использованием прозрачного красного цвета для минимального значения (0%) и насыщенного синего цвета для максимального значения.

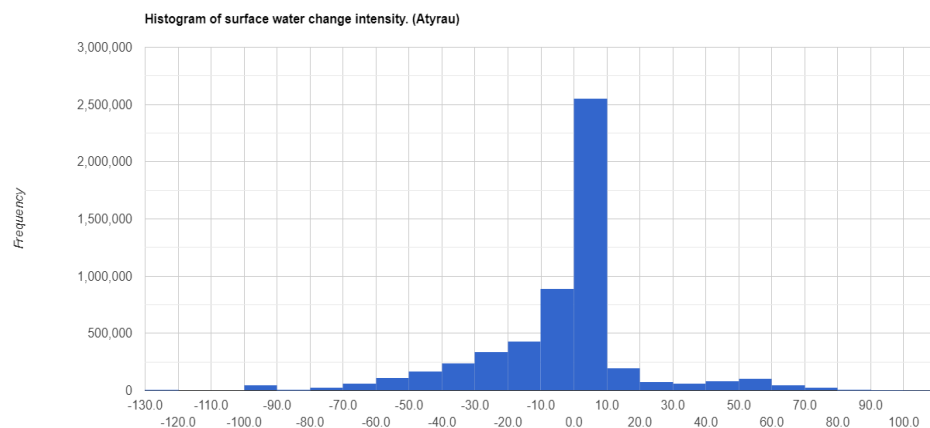


Рисунок 3.6 - Результаты вкладки консоли, отображающие гистограмму интенсивности изменения поверхностных вод Каспийского моря в регионе Актау.

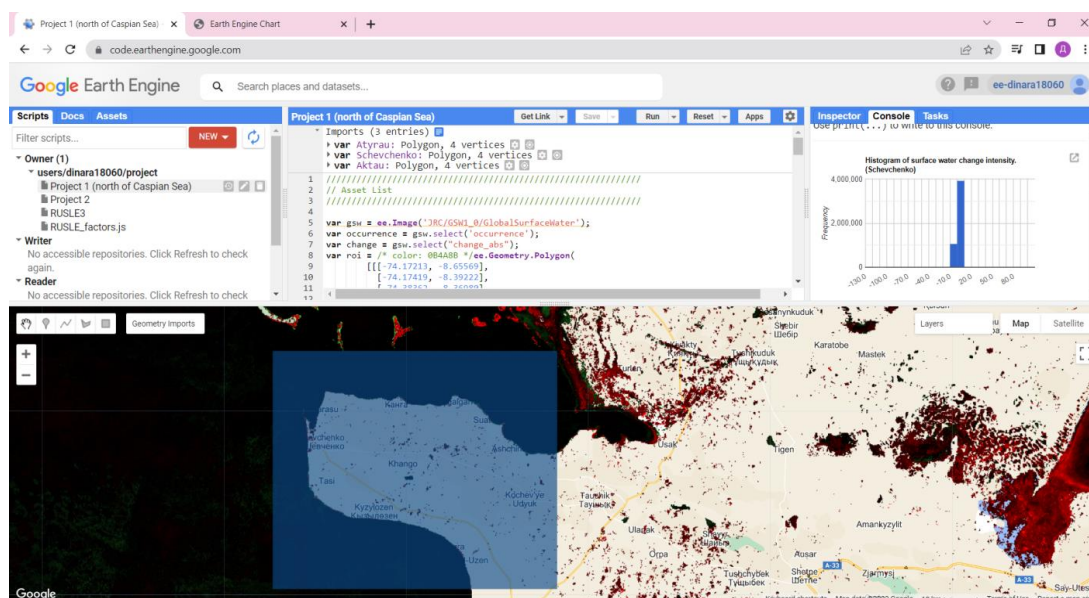


Рисунок 3.7 - Интенсивность изменения поверхностных вод в регионе Форт-Шефченко. Примечание: Красный/зеленый цвет указывает на уменьшение/увеличение появления поверхностных вод между эпохами.

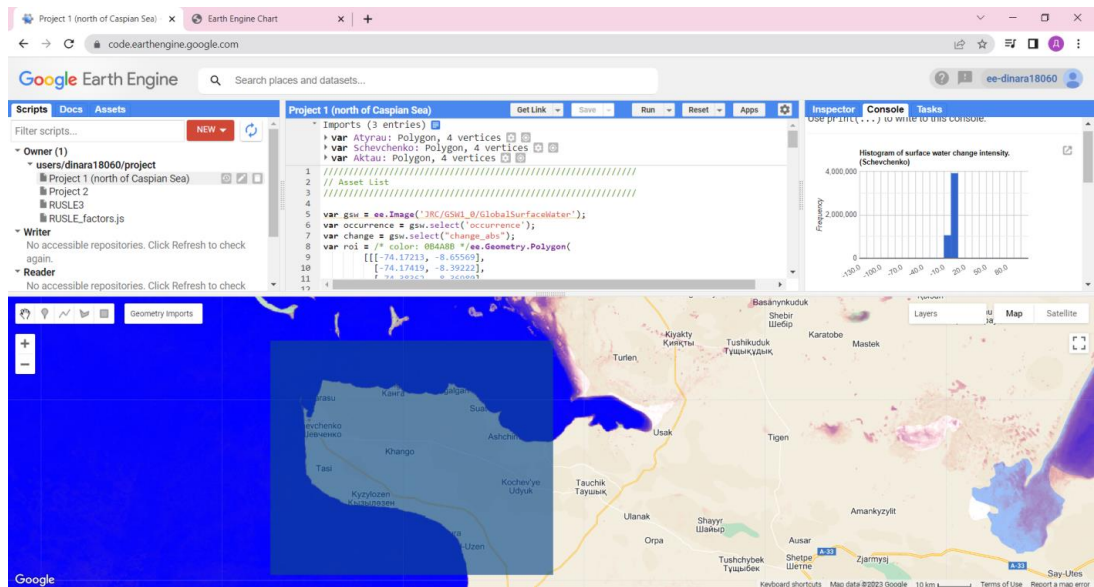


Рисунок 3.8 - Снимок экрана распределения появления воды в регионе Форт - Шефченко, с использованием прозрачного красного цвета для минимального значения (0%) и насыщенного синего цвета для максимального значения.

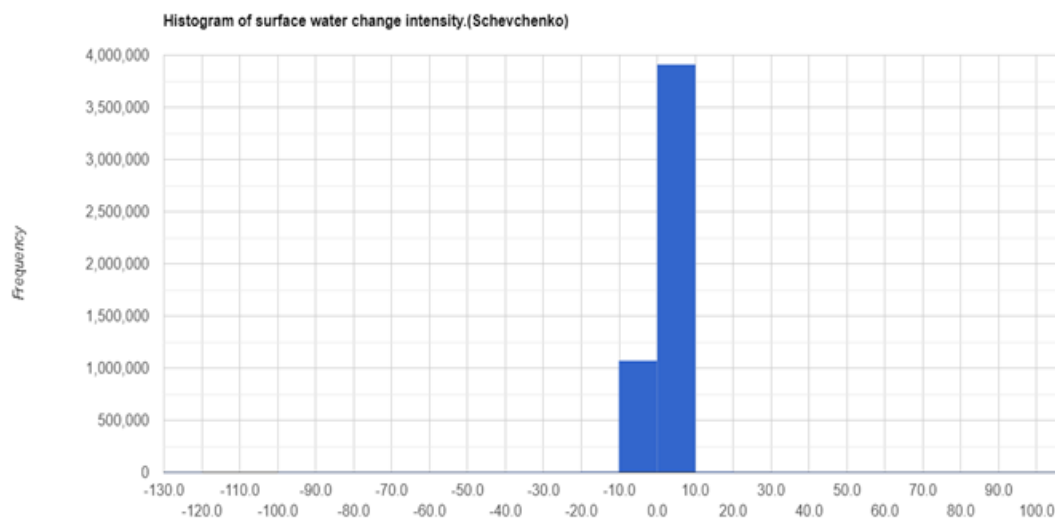


Рисунок 3.9 - Результаты вкладки консоли, отображающие гистограмму интенсивности изменения поверхностных вод Каспийского моря в регионе Форт-Шефченко.

Завершение оценки изменения уровня прибрежной зоны Каспийского моря является важным этапом в изучении сложной экосистемы. Используя возможности платформы Google Earth Engine, исследование успешно провело обзор и анализ пространственно-временной динамики прибрежной зоны, предоставив всестороннюю оценку изменения уровня моря. Обработанные результаты предоставляют ценную информацию для лиц,

принимающих решения, исследователей и заинтересованных сторон, чтобы поддерживать планирование, разработку политик и устойчивое управление Каспийским морем и его прибрежными регионами. Применение Google Earth Engine в этом исследовании демонстрирует его потенциал как мощного инструмента для анализа прибрежных зон и подчеркивает его актуальность для решения критических экологических проблем.

Согласно мнению экспертов, наименьшее количество осадков в Каспийском море наблюдалось в период с 2006 по 2020 год, а процессы испарения были более интенсивными [86]. Кроме того, из-за ряда маловодных лет в бассейне реки Волги средний приток воды также был самым низким. Основной причиной этого водного дефицита является потепление климата, охватившее весь северное полушарие [87, с. 23]. Изменения береговой линии подробно интерпретированы на Рисунке 3.6.

Таким образом, подводя итог, видно, что колебания уровня Каспийского моря, как снижающегося, так и повышающегося характера, наблюдавшиеся в прошлом, имеют долгосрочный естественный циклический характер. В последние годы глобальное потепление также начало оказывать влияние на состояние этого водного объекта. Для определения метода изучения поверхностных вод был проведен анализ опубликованных материалов о современных методах мониторинга природных водоемов на основе данных, полученных с использованием достижений спутниковой съемки, включая возможности применения таких данных для изучения динамики уровня моря в мониторинговой деятельности.

Методология

Платформа Google Earth Engine (GEE) была выбрана для данного исследования благодаря своим мощным возможностям геопространственного анализа, эффективному управлению данными и масштабируемости для обработки крупных пространственно-временных наборов данных [88, с. 18-27]. На первоначальном этапе была проведена экстракция береговой линии за несколько лет с использованием методов пороговой обработки. Для обеспечения стабильного временного и пространственного разрешения использовались многоспектральные оптические изображения Landsat 5, 7 и 8 уровня 2, коллекция 2, уровень 1, предоставленные USGS. Для целевых лет 1990, 2000, 2010, 2021 и 2024 были созданы облачно-бесплатные медианные составные изображения.

Для различения суши и воды был применен Индекс Автоматического Извлечения Воды (AWEI), после чего использовался метод пороговой обработки Отсу, который автоматически определяет пиксели воды, устанавливая оптимальное значение порога на основе распределения интенсивности пикселей [89, 90]. AWEI был выбран из-за своей высокой эффективности при обработке изображений Landsat по сравнению с другими широко используемыми индексами воды [91, с. 117-128]. Индекс определяется следующим уравнением:

$$AWEI=4\times(\text{Green}-\text{SWIR2})-(0.25\times\text{NIR}+2.75\times\text{SWIR1})(1)$$

Метод глобальной пороговой обработки присваивает пикселям значение 1, если они превышают установленный порог, и значение 0, если они ниже порога. Среди различных алгоритмов глобальной пороговой обработки метод Отсу широко признан за свою эффективность в бинарной классификации [92, с 29].

После пороговой обработки были применены морфологические операции для удаления мелких, шумных кластеров пикселей, связанных с незначительными водоемами и участками суши. Обработанные данные затем были векторизованный для очерчивания береговой линии.

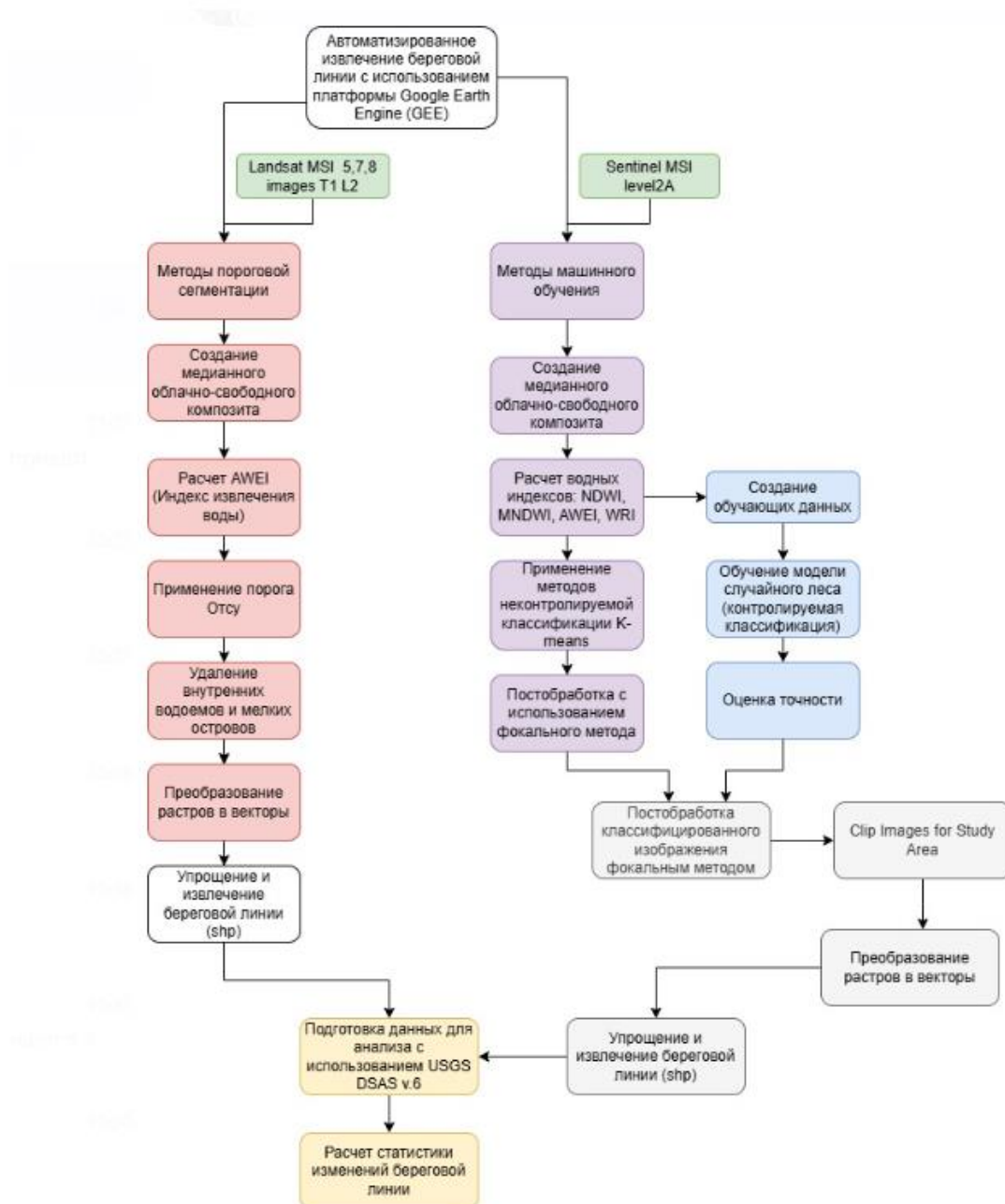


Рисунок 3.10. Блок-схема методологии автоматической экстракции береговой линии.

Вторая фаза включала обнаружение береговой линии с помощью методов машинного обучения, используя как неконтролируемой, так и контролируемой методы. Предыдущие исследования показали, что методы, основанные на машинном обучении для извлечения береговой линии, часто превосходят традиционные методы по точности и эффективности [92, с 29]. Для данного анализа были выбраны изображения Sentinel-2 уровня 2A, охватывающие период с 2019 по 2024 год.

Первым методом машинного обучения, примененным в исследовании, была неконтролируемой классификации K-means, алгоритм кластеризации, часто используемый в дистанционном зондировании для картирования земного покрова и выявления изменений [93, 13]. В GEE алгоритм K-means группирует пиксели с похожими спектральными характеристиками, итеративно минимизируя дисперсию внутри кластеров и максимизируя дисперсию между кластерами. Для выполнения классификации была использована функция `ee.Clusterer.wekaKMeans()` в GEE, где задавалось количество кластеров для представления различных классов суши и воды [88, с. 18-27].

Изображения Sentinel-2 уровня 2A были использованы в качестве основного исходного набора данных благодаря высокому пространственному и временному разрешению, что делает их идеальными для многолетнего мониторинга береговой линии. Для повышения точности классификации было использовано шесть спектральных полос (синий, зеленый, красный, NIR, SWIR1 и SWIR2), дополненных четырьмя вычисленными водными индексами: NDWI, MNDWI, AWEI и WRI. Включение как спектральных полос, так и водных индексов улучшает способность модели различать водоемы от других типов земного покрова, подчеркивая спектральные изменения, характерные для водных объектов.

Метод K-means был выбран за свою вычислительную эффективность и способность предоставлять предварительные результаты классификации без необходимости в метках обучающих данных. Этот неконтролируемой метод генерирует предварительные классификационные результаты, которые могут быть дополнительно уточнены с помощью методов постобработки. Таблица 1 содержит сводку по полосам Sentinel-2 и вычисленным водным индексам, использованным как для неконтролируемых, так и для контролируемых методов машинного обучения.

Таблица 3.1. Входные полосы для методов машинного обучения (неконтролируемые и контролируемые).

Полоса/Индекс	Описание	Тип полосы/индекса
Blue	Sentinel-2 Blue band (490 nm)	Sentinel-2 Band
Green	Sentinel-2 Green band (560 nm)	Sentinel-2 Band

Red	Sentinel-2 Red band (665 nm)	Sentinel-2 Band
NIR	Sentinel-2 Near Infrared band (842 nm)	Sentinel-2 Band
SWIR1	Sentinel-2 Shortwave Infrared band 1 (1614 nm)	Sentinel-2 Band
SWIR2	Sentinel-2 Shortwave Infrared band 2 (2194 nm)	Sentinel-2 Band
NDWI	Normalized Difference Water Index	Water Index
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index	Water Index
AWEI	Automated Water Extraction Index	Water Index
WRI	Water Reflection Index	Water Index

Алгоритм Random Forest (RF) является широко используемым контролируемым методом машинного обучения, известным своей надежностью, высокой точностью классификации и устойчивостью к переобучению. Он работает путем построения нескольких деревьев решений в процессе обучения, при этом каждое дерево обучается на случайной подвыборке данных. Финальное предсказание производится путем агрегации большинства голосов всех деревьев решений, что помогает уменьшить дисперсию и улучшить стабильность модели в целом [94, с 5-32]. Эта техника ансамблевого обучения обеспечивает хорошую работу модели даже на сложных и высокоразмерных наборах данных.

В данном исследовании классификатор RF был применен с использованием функции `ee.Classifier.smileRandomForest()` в Google Earth Engine (GEE), специально разработанной для обработки геопространственных данных в больших объемах [88, с. 18-27]. Набор данных для классификации состоял из изображений Sentinel-2 уровня 2A с 2019 по 2024 годы, которые обеспечивали высокое пространственное и временное разрешение. В качестве входных признаков для обучения модели использовались шесть спектральных полос (синий, зеленый, красный, NIR, SWIR1 и SWIR2), а также четыре вычисленных водных индекса (NDWI, MNDWI, AWEI и WRI).

Выбор Random Forest был обусловлен его способностью эффективно обрабатывать большие наборы данных, устойчивостью к высокоразмерным данным и надежной производительностью в задачах классификации, что делает его идеальным выбором для сложных приложений дистанционного зондирования [95, с. 24-31]. Сочетание масштабируемых возможностей GEE и мощности алгоритма RF позволило эффективно обрабатывать и анализировать многолетние данные Sentinel-2 для извлечения береговой линии на обширных географических территориях.

Для входных данных были выбраны изображения Sentinel-2 уровня 2A, охватывающие период с 2019 по 2024 год. Использовались шесть спектральных полос — синий, зеленый, красный, NIR, SWIR1 и SWIR2, дополненные четырьмя вычисленными водными индексами: NDWI, MNDWI, AWEI и WRI. Эти индексы были выбраны за их доказанную эффективность в различении водоемов и земных объектов на спутниковых изображениях [91, с. 117-128]. Набор обучающих данных состоял из 160 вручную промаркированных точек, равномерно распределенных между классами воды и неводных объектов, что обеспечивало сбалансированное обучение модели.

Классификатор RF был настроен на использование 50 деревьев решений для достижения баланса между вычислительной эффективностью и точностью классификации. После генерации классифицированного изображения был применен фильтр Focal Mode для уменьшения шума, сглаживания изолированных кластеров пикселей и улучшения пространственной согласованности. Полученное классифицированное изображение было затем векторизовано и экспортировано с использованием QGIS. Все классифицированные изображения и векторные файлы были переопределены в координатную систему WGS 84 / UTM Zone 39N для обеспечения согласованности. Для постобработки векторизованных особенностей береговой линии были применены методы упрощения с допуском в 30 метров для данных Landsat и 10 метров для данных Sentinel-2.

Это исследование проанализировало изменения береговой линии в районе Актау для годов 1990, 2010, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 и 2024 с использованием Системы Анализа Береговой Линии (DSAS) для оценки масштаба и темпа долгосрочных изменений береговой линии за семилетний период. Версия DSAS 6 была установлена на локальный компьютер, и были внесены корректировки в набор данных на основе выборочных данных, включая создание базовых линий как для прибрежной, так и для оффшорной зоны. Все полученные данные были сохранены в формате GeoJSON для дальнейшего анализа.

Система Анализа Береговой Линии (DSAS) является специализированным инструментом для количественной оценки изменений береговой линии и изучения её сдвигов с течением времени. Она использует геопространственные данные, включая позиции береговой линии и временные последовательности, для оценки пространственной изменчивости в движении береговой линии [96, 107-134]. Методология включает в себя создание базовых линий как для прибрежной, так и для оффшорной зоны, по которым проводят перпендикулярные трансекты. Эти трансекты измеряют расстояние между позициями береговой линии на разных временных интервалах, что позволяет вычислить такие ключевые метрики, как скорость эрозии и аккреции. DSAS предоставляет как статистические, так и графические представления динамики береговой линии, что дает ценную информацию о поведении береговой линии в течение продолжительных периодов времени. Инструмент совместим с различными форматами ввода, включая shapefiles и GeoJSON, и поддерживает экспорт результатов для

дальнейшего анализа в GIS программном обеспечении. Широко используемый в мониторинге и управлении прибрежными зонами, DSAS позволяет эффективно и точно оценивать изменения береговой линии [97, 98].

Результаты

Процесс обнаружения береговой линии был автоматизирован с использованием метода пороговой обработки по Отсу, примененного к продуктам Landsat 5, 7 и 8 Tier 1, полученным с датчика Landsat TM. Продукты Tier 1 были выбраны, поскольку они соответствуют строгим требованиям к геометрическому и радиометрическому качеству, необходимым для точного анализа. Вся обработка данных выполнялась на платформе Google Earth Engine (GEE), что позволило использовать облачные вычислительные мощности для оптимизации локальных ресурсов и повышения общей эффективности обработки.

Данная методология оказалась высокоэффективной с точки зрения времени и затрат благодаря использованию бесплатного и открытого программного обеспечения (FOSS) и облачной инфраструктуры GEE. Анализ проводился за несколько лет с двумя основными районами исследования: Атырау и Мангистауский регион. В связи с их географической близостью районы Актау и Форт-Шевченко были объединены в одну крупную область исследования — Мангистауский регион. Такой подход обеспечил всестороннее охват региона и поддержание пространственной согласованности на протяжении всего анализа.

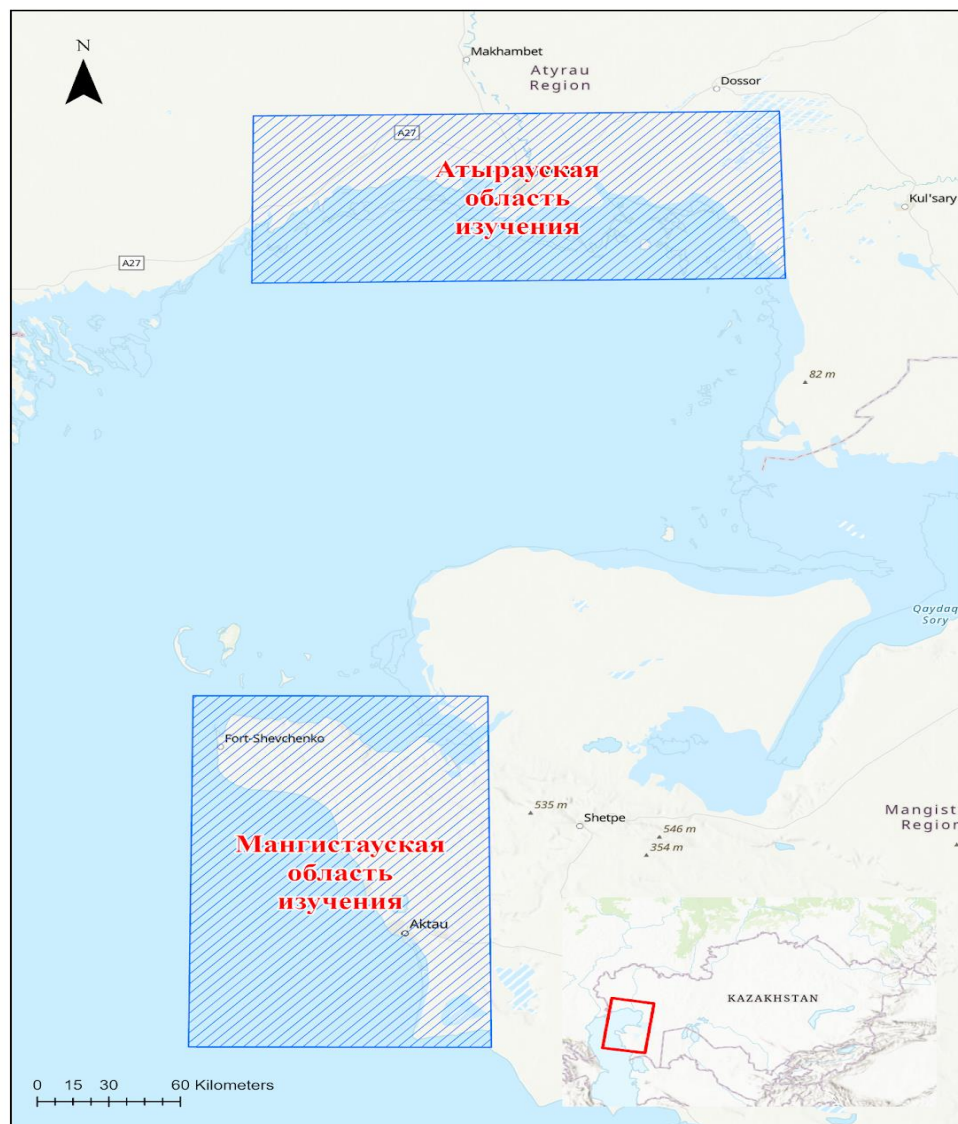
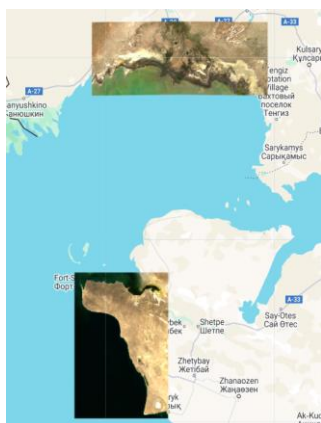


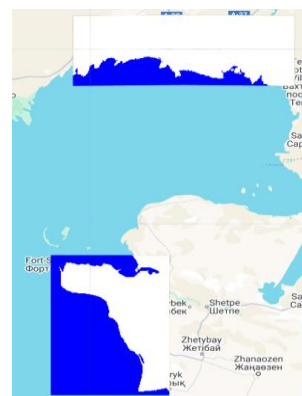
Рисунок 3.11. Районы исследования для автоматизированного извлечения береговой линии с использованием платформы GEE Javascript API IDE



а. RGB медианные составной изображение



б. AWEI до удаления мелких объектов



в. AWEI после удаления мелких объектов



д. Результаты выделения береговой линии

Рисунок 3.12. Скриншот результатов извлечения береговой линии методом пороговой обработки по Отсу на облачной платформе GEE на примере 1990 года.

В целом результаты выделения береговой линии, полученные с помощью автоматизированного метода пороговой обработки по Отсу, показали высокую точность, эффективно отображая береговую линию в большинстве участков по результатам визуальной оценки. Однако в районе исследования Атырау плотная растительность вдоль некоторых частей береговой линии привела к незначительным погрешностям в процессе выделения. Напротив, в Мангистауском регионе границы береговой линии оказались более четкими и точными благодаря преимущественно засушливому ландшафту и редкой растительности, что свело к минимуму вероятность ошибочной классификации.

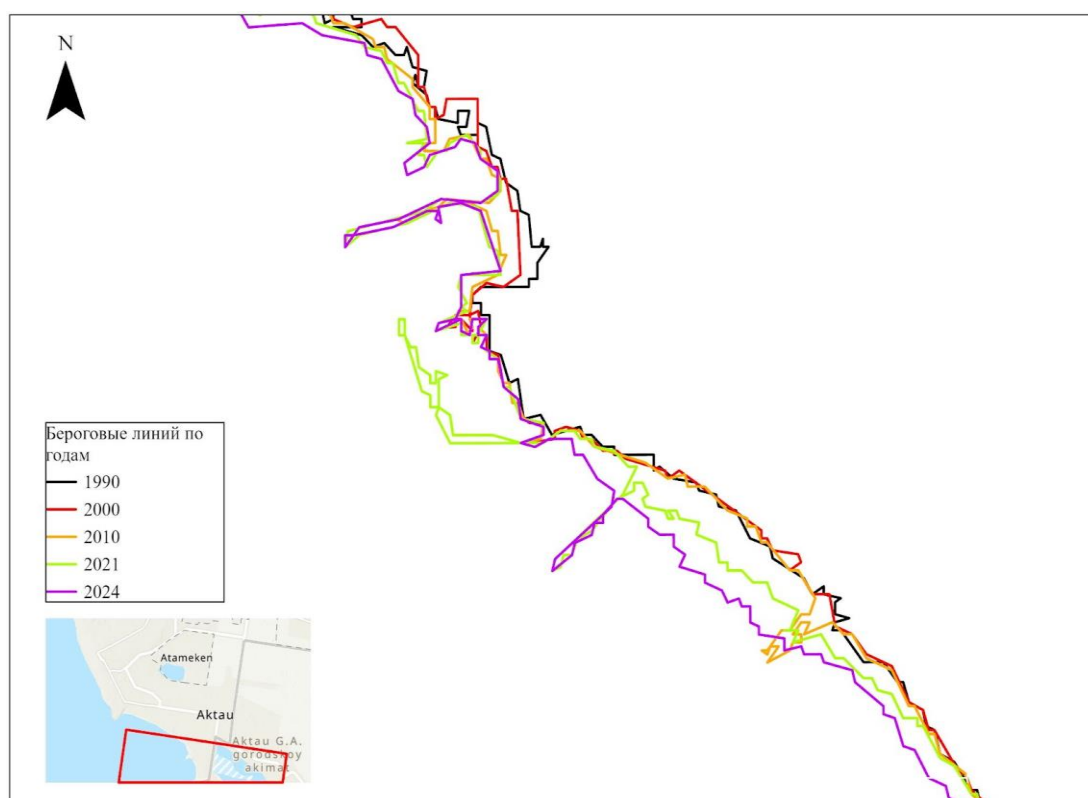


Рисунок 3.13. Карта конечного результата в векторном формате береговой линии методом пороговой обработки по Отсу на снимке Landsat по годам на примере район Актау.



Рисунок 3.14. Карта конечного результата наложенного на космический снимок Landsat по годам на примере район Актау.

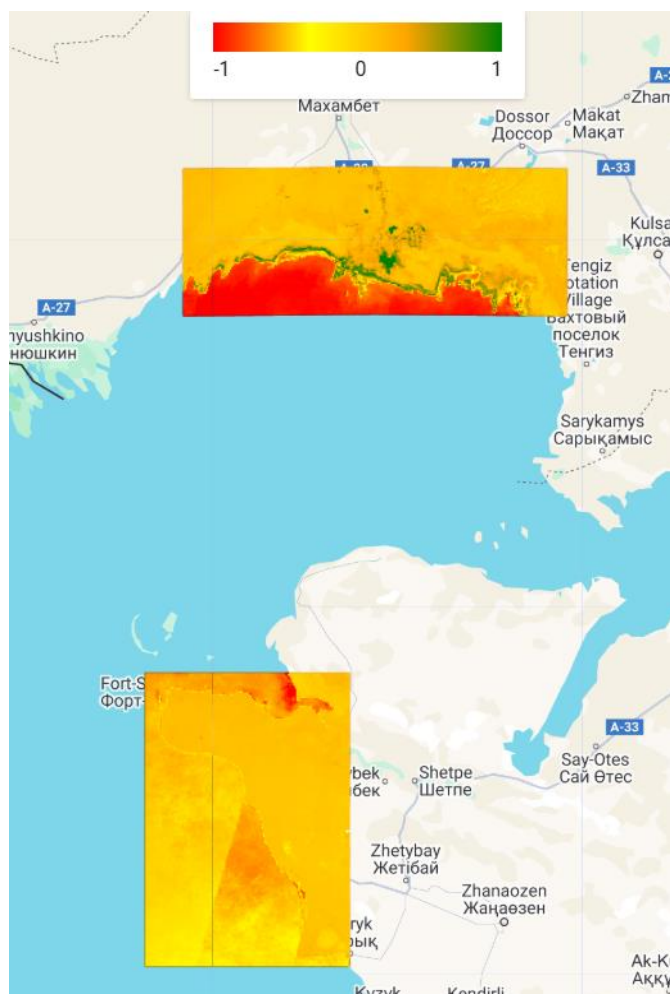
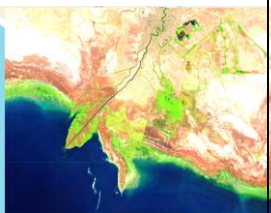
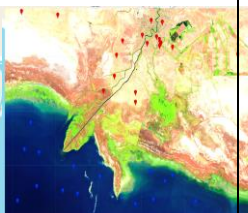
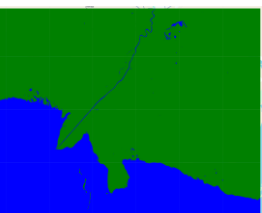
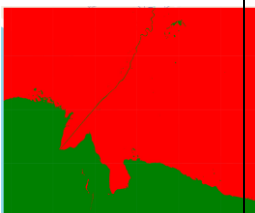
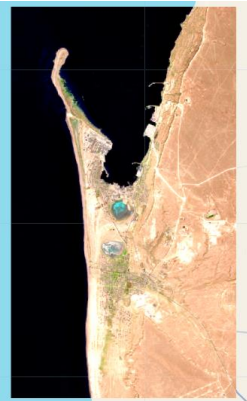
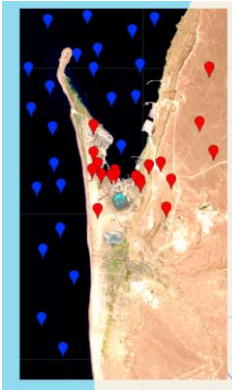
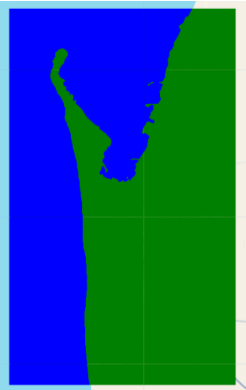
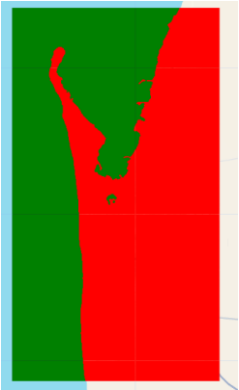


Рисунок 3.15- Пример индекса NDVI для отображения растительного покрова

Метод машинного обучения продемонстрировал высокую точность при применении к мультиспектральным изображениям Sentinel-2 уровня 2A. В плане автоматизации метод неконтролируемой классификации K-means потребовал меньше времени, так как не требовал создания размеченных обучающих наборов данных. Все результаты были оценены путем визуального сравнения с результатами, полученными с использованием метода пороговой обработки Отсу для Landsat. В результате береговая линия, извлеченная из данных Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м, предоставила более детализированные результаты по сравнению с разрешением 30 м для изображений Landsat.

Таблица 3.2. Результаты извлечения бинарного растрового изображения (вода или суша) с использованием методов машинного обучения на облачной платформе GEE для последующего извлечения векторных данных береговой линии.

Наименование участка	а. SWIR медианные составные изображения	б. Обучающие образцы: синим обозначена вода, зеленым — суша	в. Результат неконтролируемой классификации K-means	г. Результаты контролируемой классификации Random Forest
Атырауский район				
Форт-Шевченко				

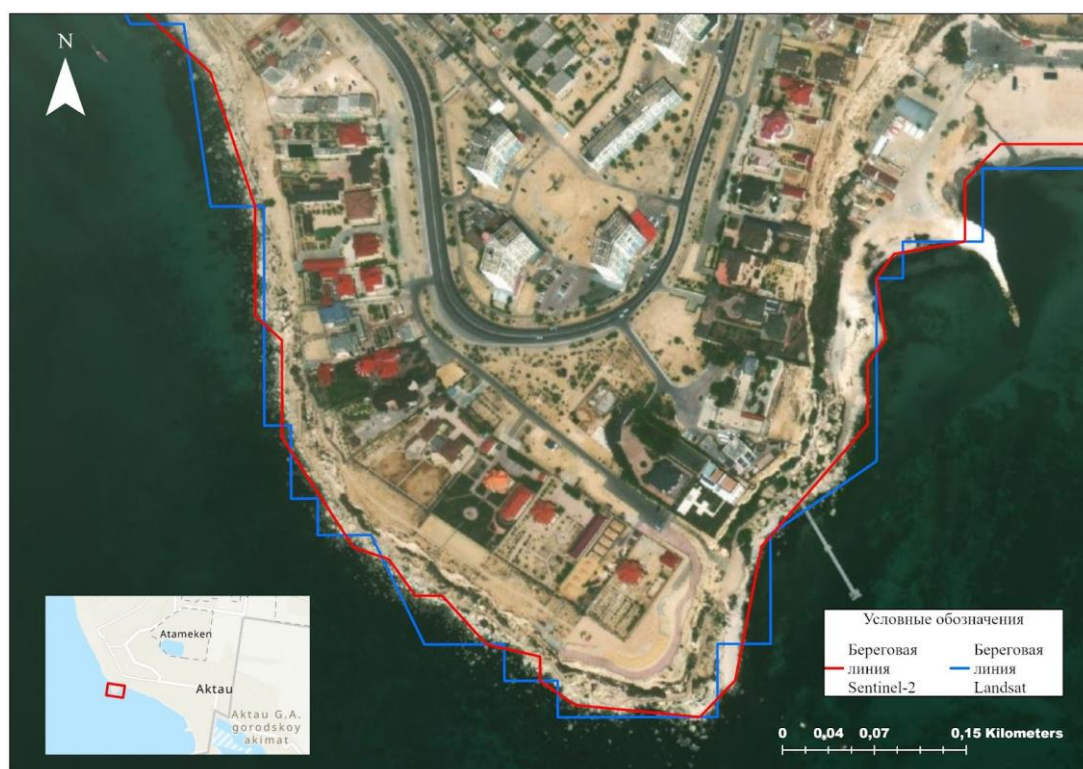
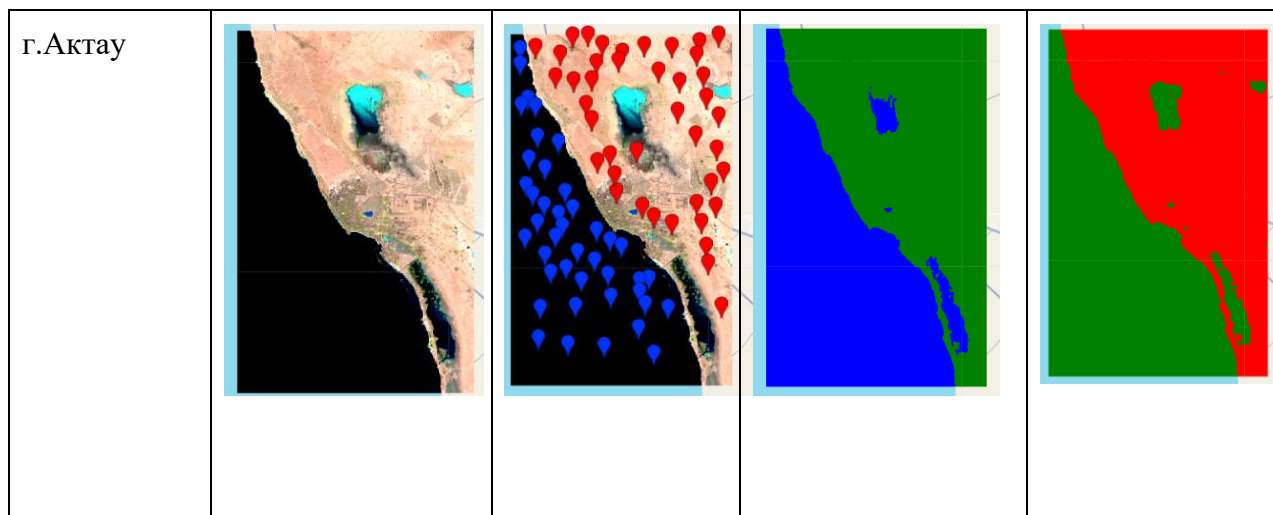
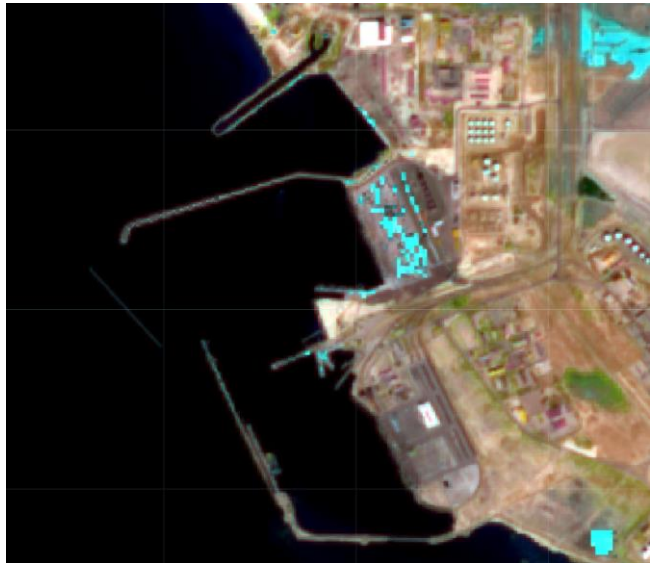
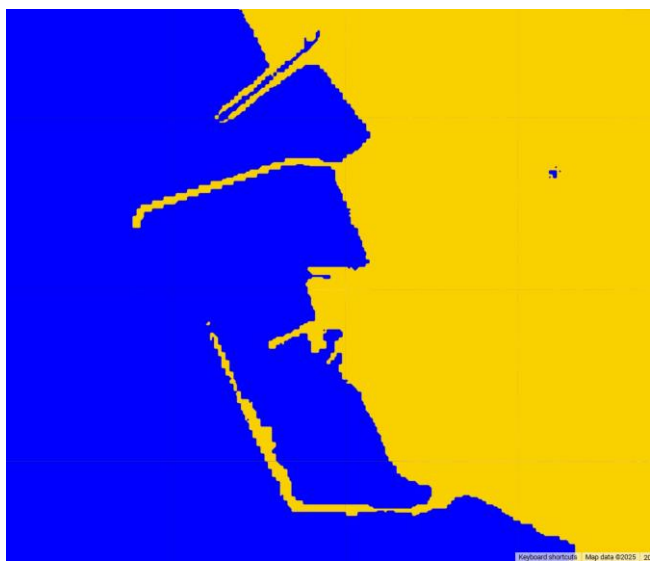
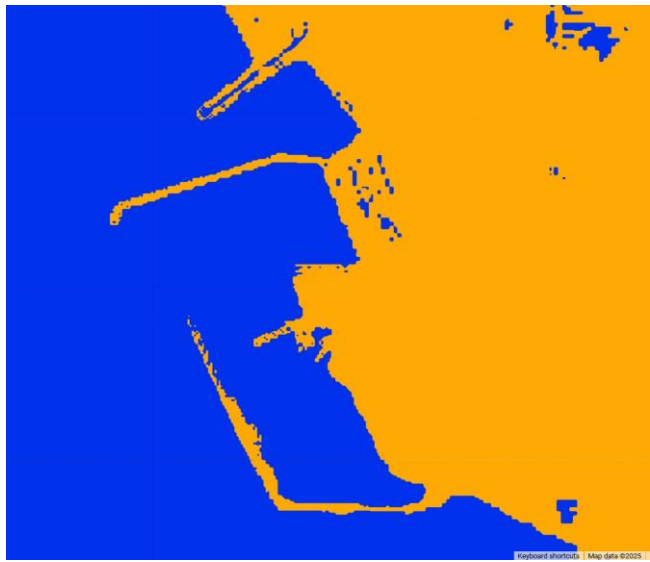


Рисунок 3.16 - Сравнение береговой линии по данным Landsat и Sentinel 2 с увеличением в районе Актау. Красная линия представляет результаты из данных Sentinel 2 с методом неконтролируемой классификации K-means.

Синяя линия представляет береговую линию, полученную методом пороговой обработки Отсу для изображений Landsat.

Несмотря на высокую точность обучения и валидации, контролируемая классификация Random Forest показала более низкую точность по сравнению с методом неконтролируемой кластеризации K-means, исходя из визуальной оценки результатов классификации. В результате, для дальнейшего анализа с использованием DSAS была выбрана береговая линия, полученная с помощью метода неконтролируемой кластеризации K-means.

Таблица 3.3. Результаты классификаций с использованием метода машинного обучения — неконтролируемой кластеризации K-means и контролируемой классификации Random Forest на платформе GEE с увеличением в районе Актау

	а. Медианные композиции SWIR Sentinel
	б.Изображение неконтролируемой классификации K-means
	с. Изображение контролируемой классификации Random Forest

Для обучающей, так и для валидационной выборок точность составила 100% для 160 размеченных точек, что сохранялось для всех периодов. Пять метрик точности были рассчитаны с использованием платформы Google Earth Engine (GEE) с JavaScript API: общая точность, коэффициент Каппы, точность производителя, точность пользователя и матрица ошибок. Эти результаты представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Результаты точности обучения и валидации для контролируемой классификации Random Forest на платформе GEE

Тип данных	Общая точность	Коэффициент Каппы	Точность производителя	Точность пользователя	Матрица ошибок
Обучение на всех года одинакова	1	1	0:[1] 1:[1]	0:1 1:1	0:[61,0] 1:[0,53]
Валидация на всех года одинакова	1	1	0:[1] 1:[1]	0:1 1:1	0:[19,0] 1:[0,27]
Скриншот результата на GEE IDE Platform	##### TRAINING ACCURACY ##### RF: overall accuracy: 1 RF: kappa coefficient: 1 RF: producer's accuracy: ▸ [[1],[1]] RF: user's accuracy: ▸ [[1,1]] RF: error matrix: ▸ [[61,0],[0,53]] ##### VALIDATION ACCURACY ##### RF: overall accuracy: 1 RF: kappa coefficient: 1 RF: producer's accuracy: ▸ [[1],[1]] RF: user's accuracy: ▸ [[1,1]] RF: error matrix: ▸ [[19,0],[0,27]]				

Таблица 3.5 - Результаты анализа с использованием системы цифрового анализа береговой линии (DSAS) по данным Landsat

Береговая линия	Период времени	SCE_average distance(m)	NSM_average distance(m)	EPR average rate (m/year)	LLR average rate (m/year)	WLR average rate (m/year)	NSM positive distance %	NSM negative distance %
город Актау	1990-2024	223,27	158,38	4,68	5,03	5,03	96,3	3,7
район Форт-Шевченко	1990-2024	145,89	101,21	5,73	3,82	3,82	92,45	7,55

Статистика анализа изменений береговой линии DSAS в Актау и Форт-Шевченко по оптическим данным Landsat (период 1990-2024 гг.)

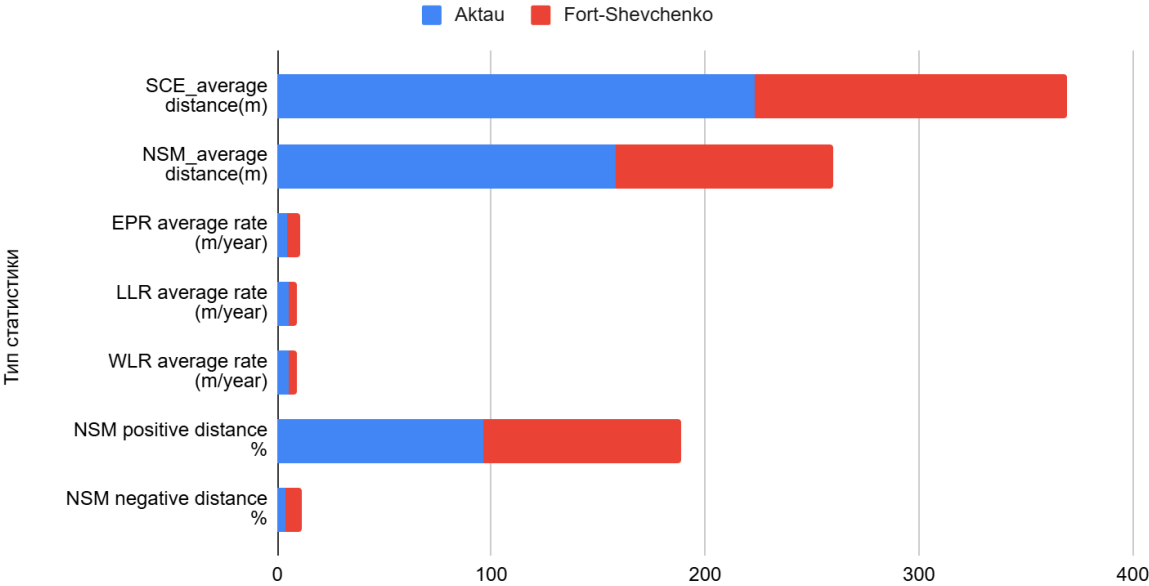


Рисунок 3.17 – Изменение береговой линии по данным Landsat

Таблица 3.5 - Результаты анализа с использованием системы цифрового анализа береговой линии (DSAS) Sentinel 2

Береговая линия	Период времени	SCE_average distance(m)	NSM_average distance(m)	EPR average rate (m/year)	LLR average rate (m/year)	WLR average rate (m/year)	NSM positive distance %	NSM negative distance %
город Актау	2019-2024	95,61	87,81	17,56	19,03	19,03	91,47	8,53
район Атырау	2019-2024	2546,06	2510,15	576,44	594,31	594,31	99,69	0,31

район Форт- Шевченко	2019- 2024	54,31	48,63	9,75	10,89	10,89	92,11	7,89
----------------------------	---------------	-------	-------	------	-------	-------	-------	------

Статистика анализа изменений береговой линии DSAS в Актау, Атырау и Форт-Шевченко по оптическим данным Sentinel 2 (период 2019-2024 гг.)

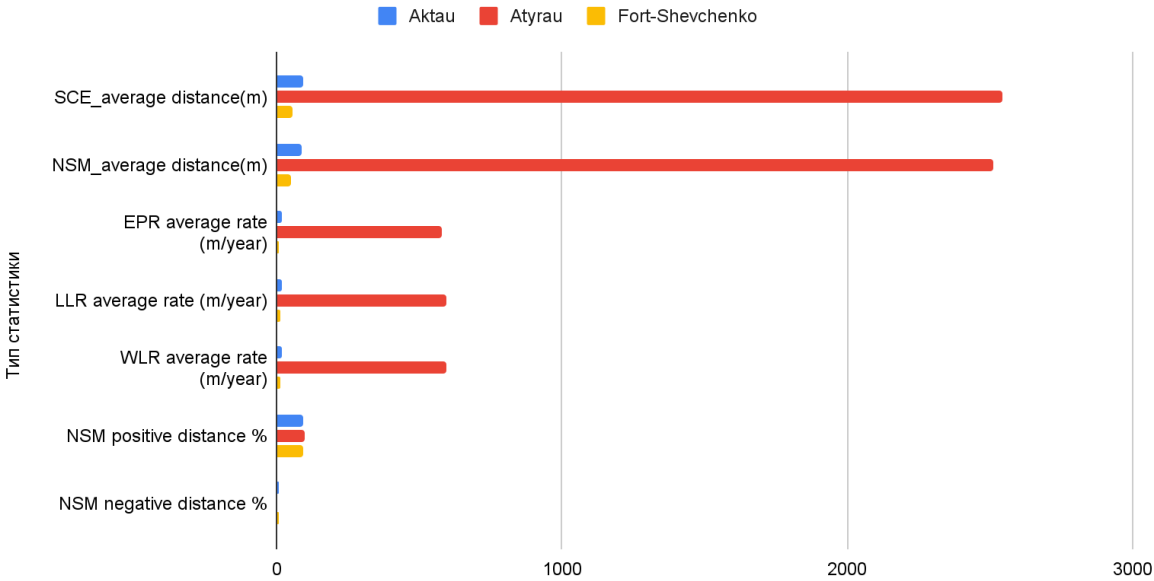


Рисунок 3.18 - Изменение береговой линии по данным Sentinel 2

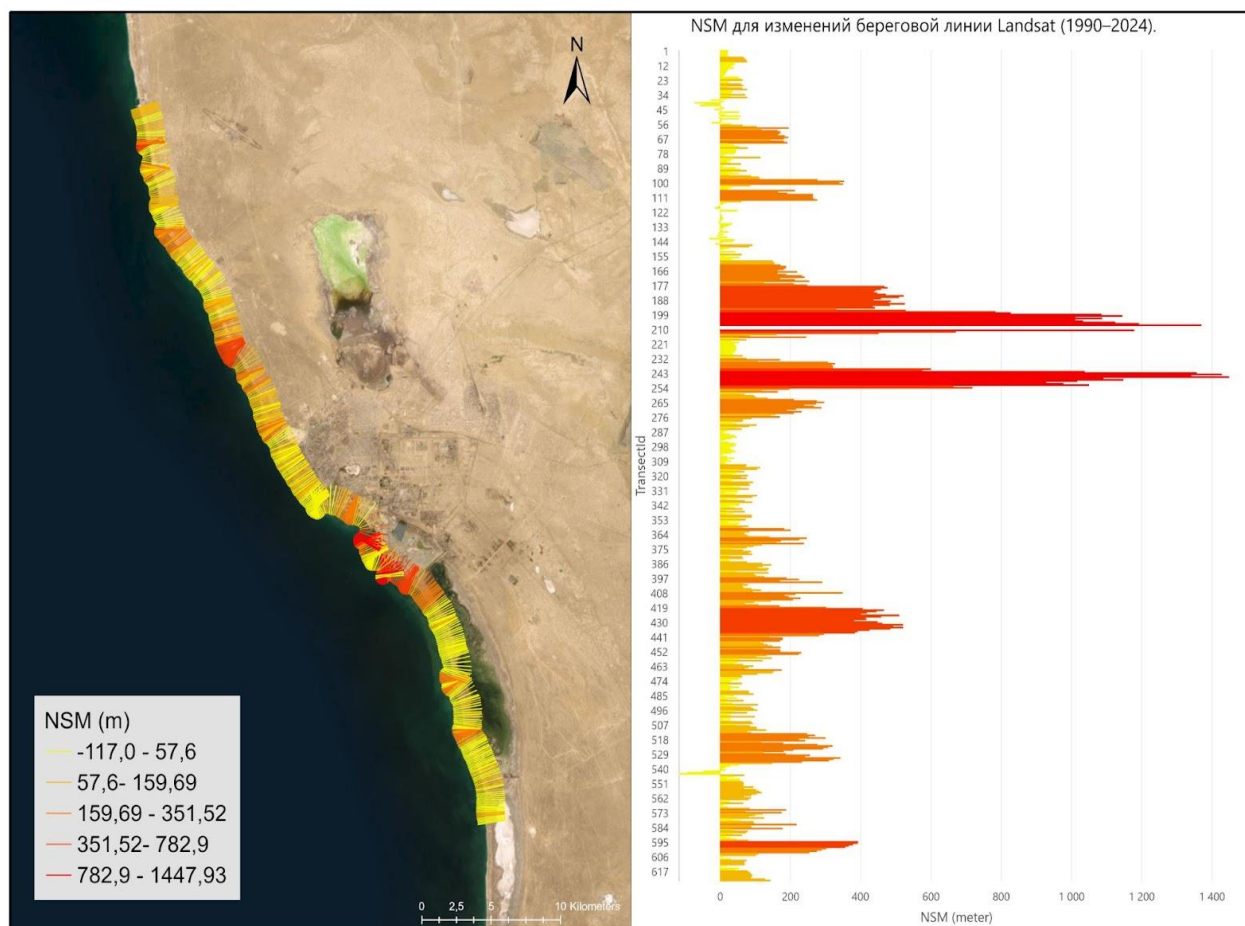


Рисунок 3.19 - Результаты анализа изменений береговой линии город Актау с использованием Landsat на основе DSAS (1990–2024)

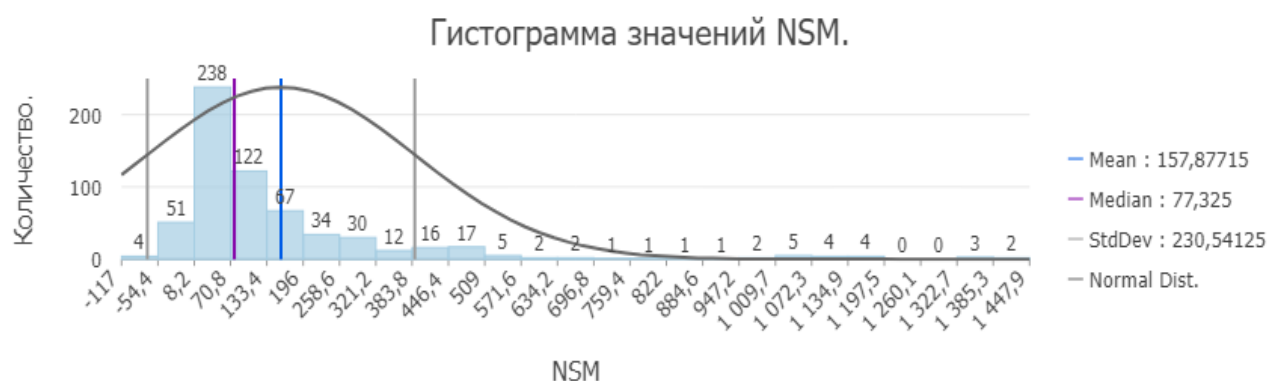


Рисунок 3.20 - Гистограмма значений NSM город Актау с использованием Landsat

$$y = -37,8749766143 + 0,8795573358 x$$

$$R^2 = 0,809061738$$

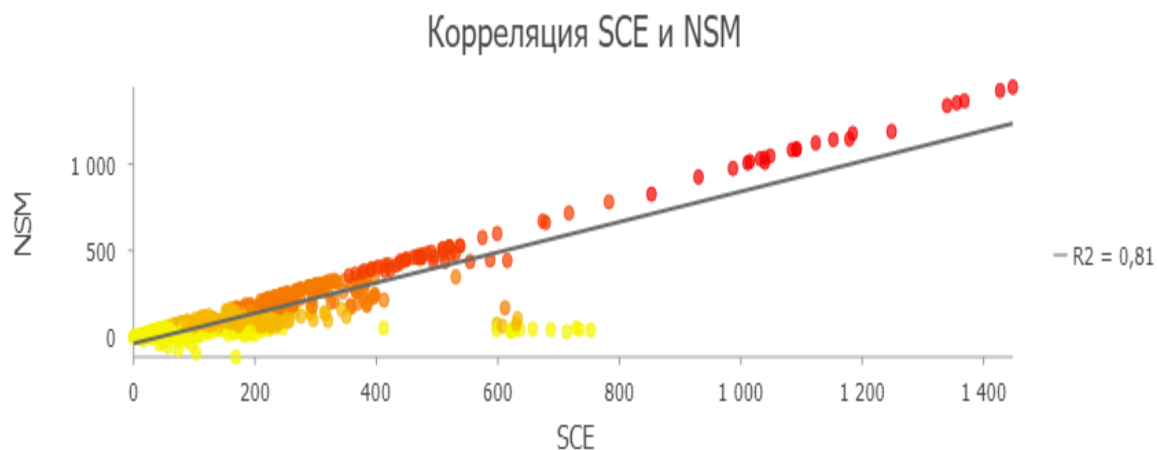


Рисунок 3.21 - Корреляция SCE и NSM город Актау с использованием Landsat

Результаты анализа изменений береговой линии город Актау с использованием Sentinel-2 на основе DSAS (2019–2024) (а- карта изменение береговой линий с графиком, б- Гистограмма значений NSM, с-Корреляция SCE и NSM)

а)

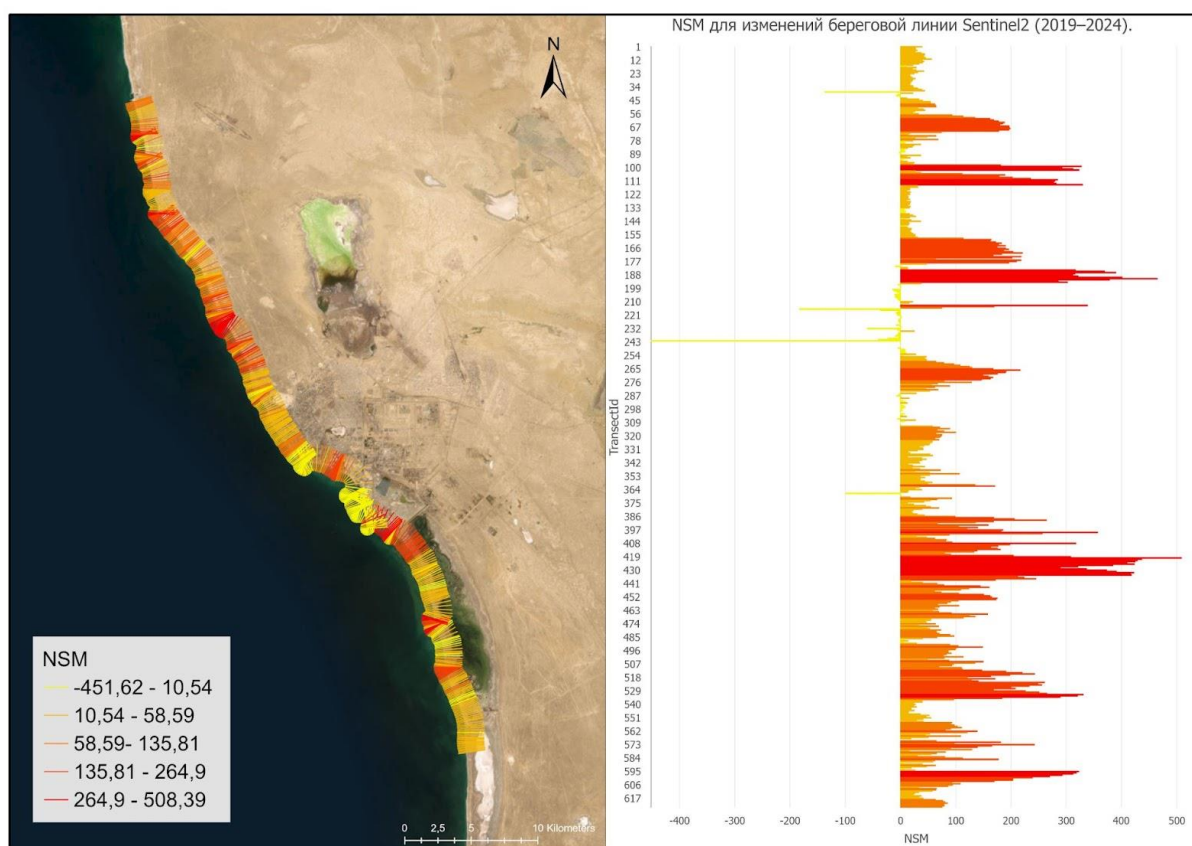


Рисунок 3.22 - Результаты анализа изменений береговой линии город Актау с использованием Sentinel 2 на основе DSAS (1990–2024)

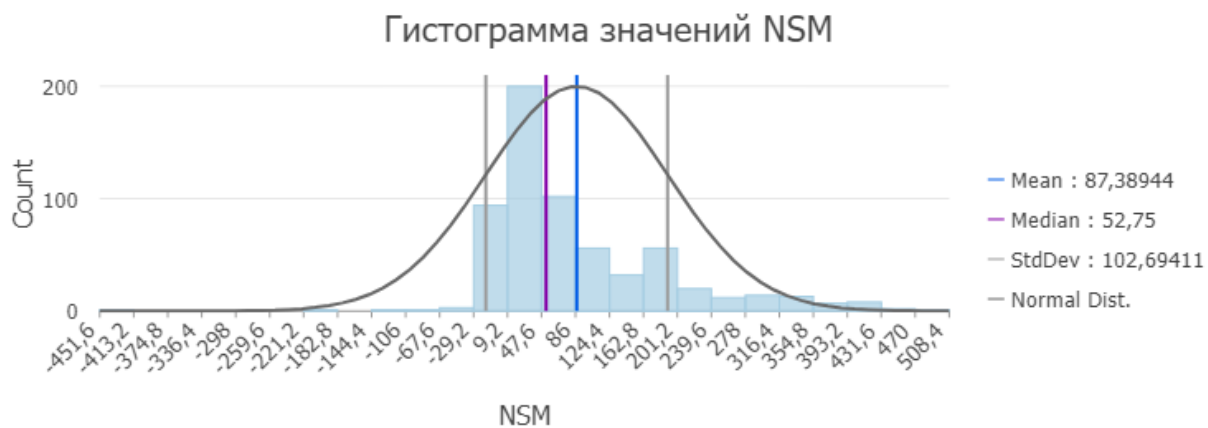


Рисунок 3.23 - Гистограмма значений NSM город Актау с использованием Sentinel 2

$$y = 17,3681816011 + 0,8953649434 x$$

$$R^2 = 0,8173502365$$

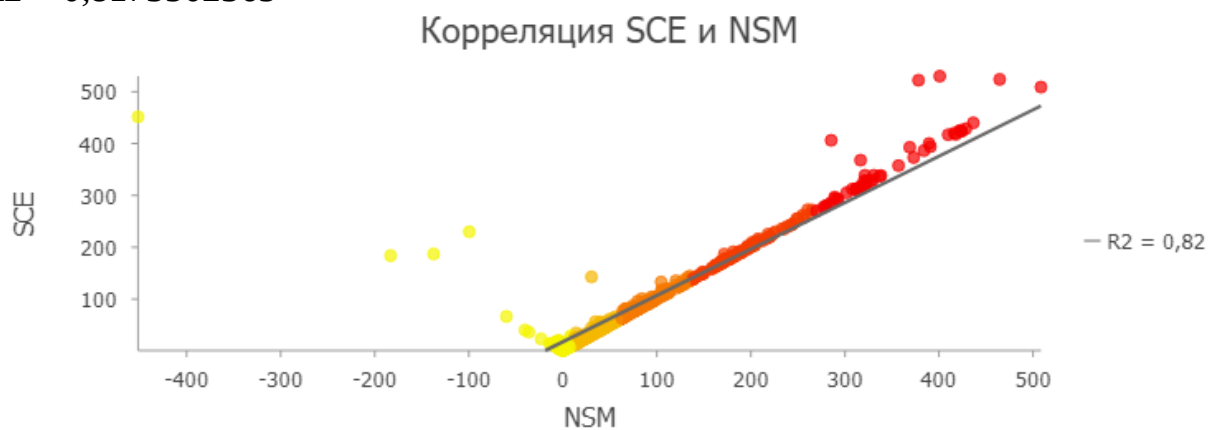


Рисунок 3.24 - Корреляция SCE и NSM город Актау с использованием Sentinel 2

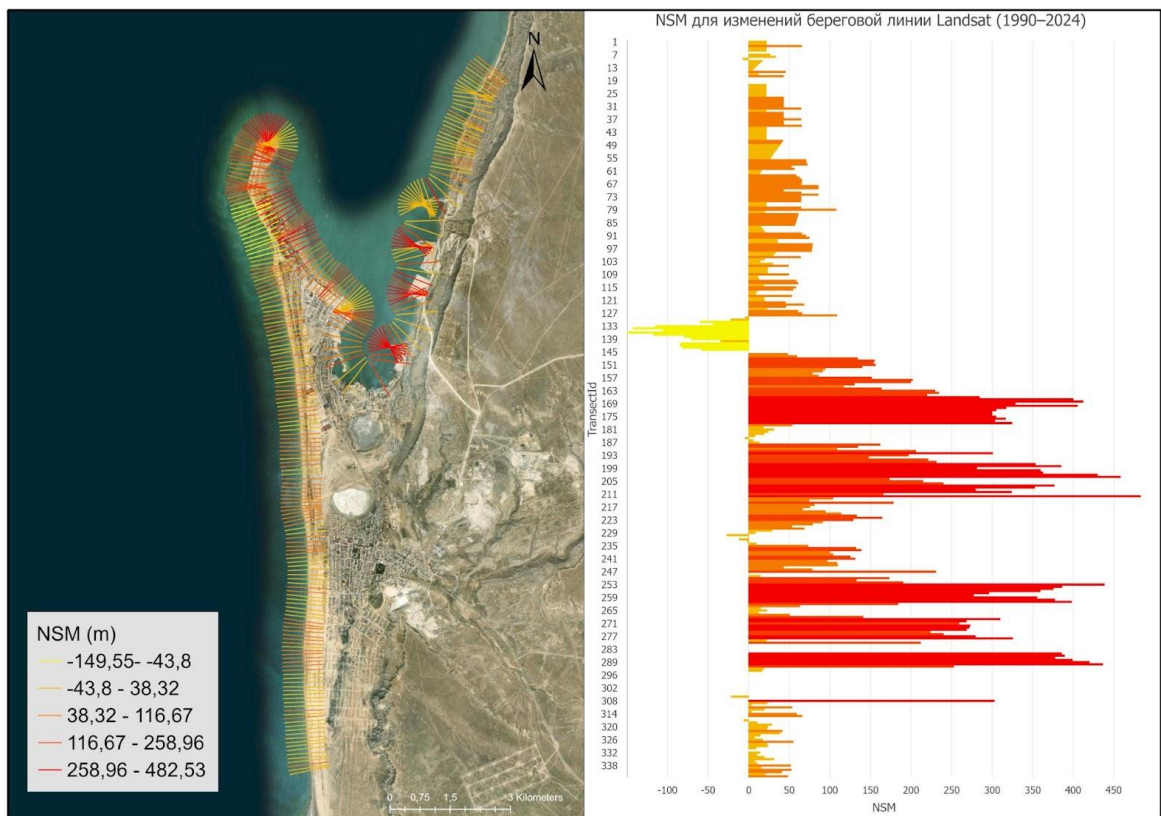


Рисунок 3.25 - Результаты анализа изменений береговой линии город Форт-Шевченко с использованием Landsat на основе DSAS (1990–2024)
Гистограмма значений NSM

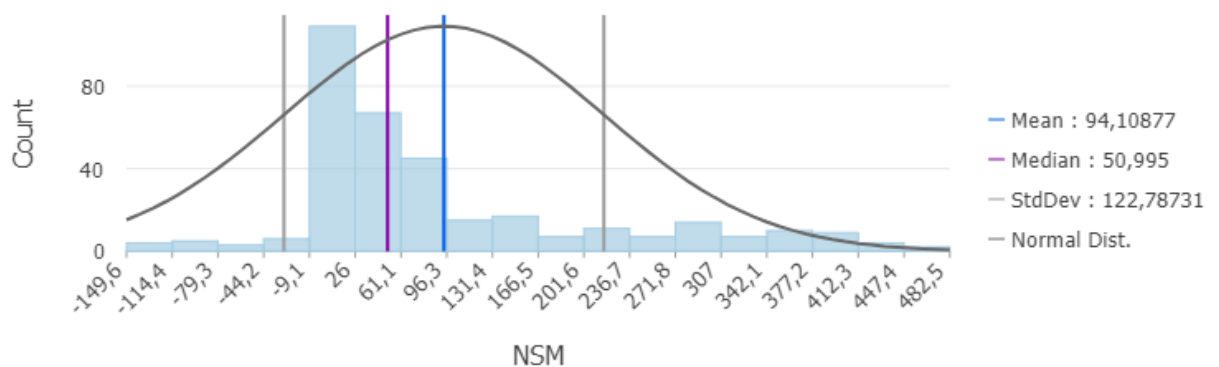


Рисунок 3.26 - Гистограмма значений NSM город Форт-Шевченко с использованием Landsat

$$y = 59,3192919245 + 0,8518754633 x$$

$$R^2 = 0,7822344411$$

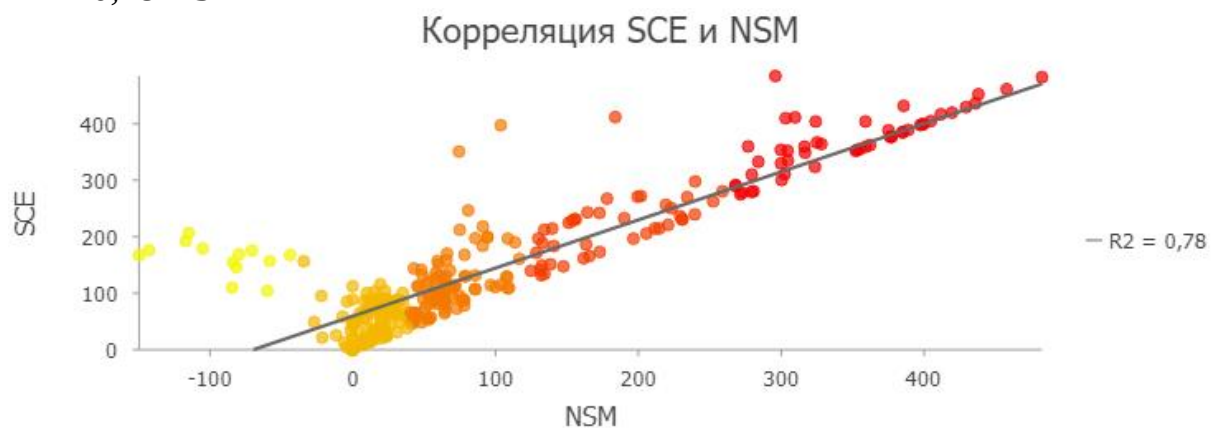


Рисунок 3.27 - Корреляция SCE и NSM город Форт-Шевченко с использованием Landsat

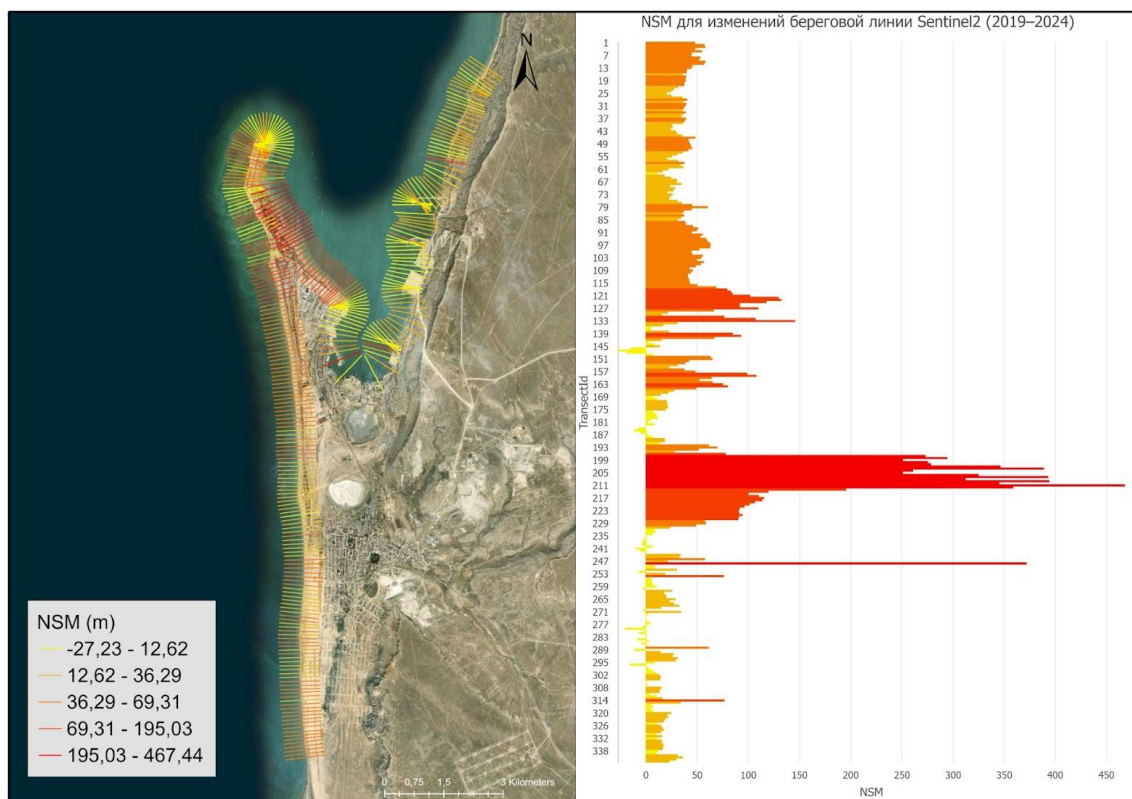


Рисунок 3.28 - Результаты анализа изменений береговой линии город Форт-Шевченко с использованием Sentinel-2 на основе DSAS (2019–2024)
Гистограмма значений NSM

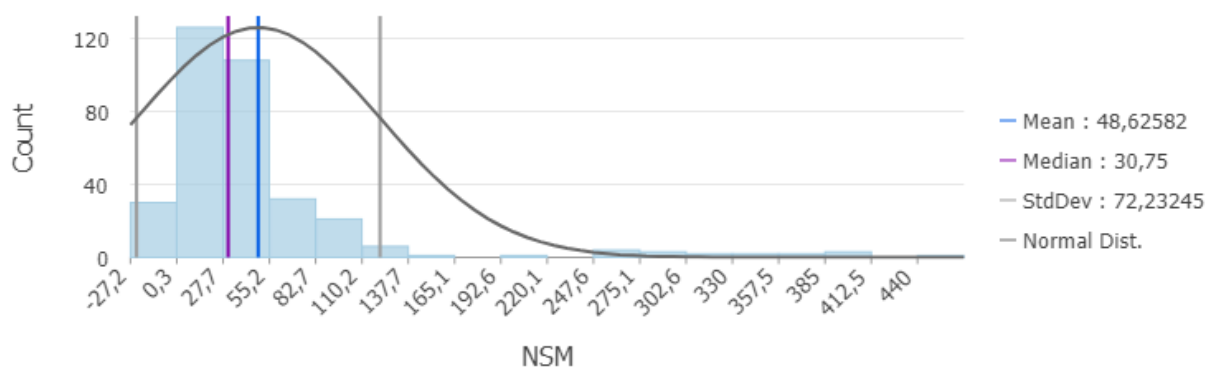


Рисунок 3.29 - Гистограмма значений NSM город Форт-Шевченко с использованием Sentinel-2 на основе DSAS (2019–2024)

$$y = -4,9235680868 + 0,986011957 x$$

$$R^2 = 0,9662212064$$

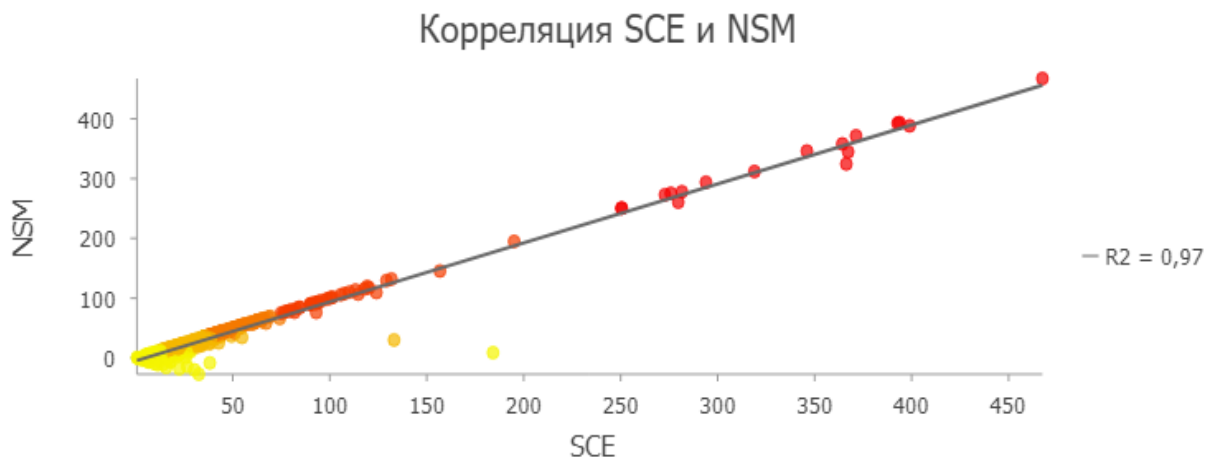


Рисунок 3.30 - Корреляция SCE и NSM город Форт-Шевченко с использованием Sentinel-2 на основе DSAS (2019–2024)

Результаты для региона Атырау не были реализованы из-за сложных изменений береговой линии между 1990 и 2024 годами по данным спутника Landsat. Результаты обнаруженных изменений представлены на карте ниже, где красным цветом указана область, которая была покрыта водой в 1990 году, но в настоящее время эта территория покрыта землёй. Кроме того, изменения между 2019 и 2024 годами были проанализированы с использованием статистики изменений DSAS на основе данных Sentinel-2.

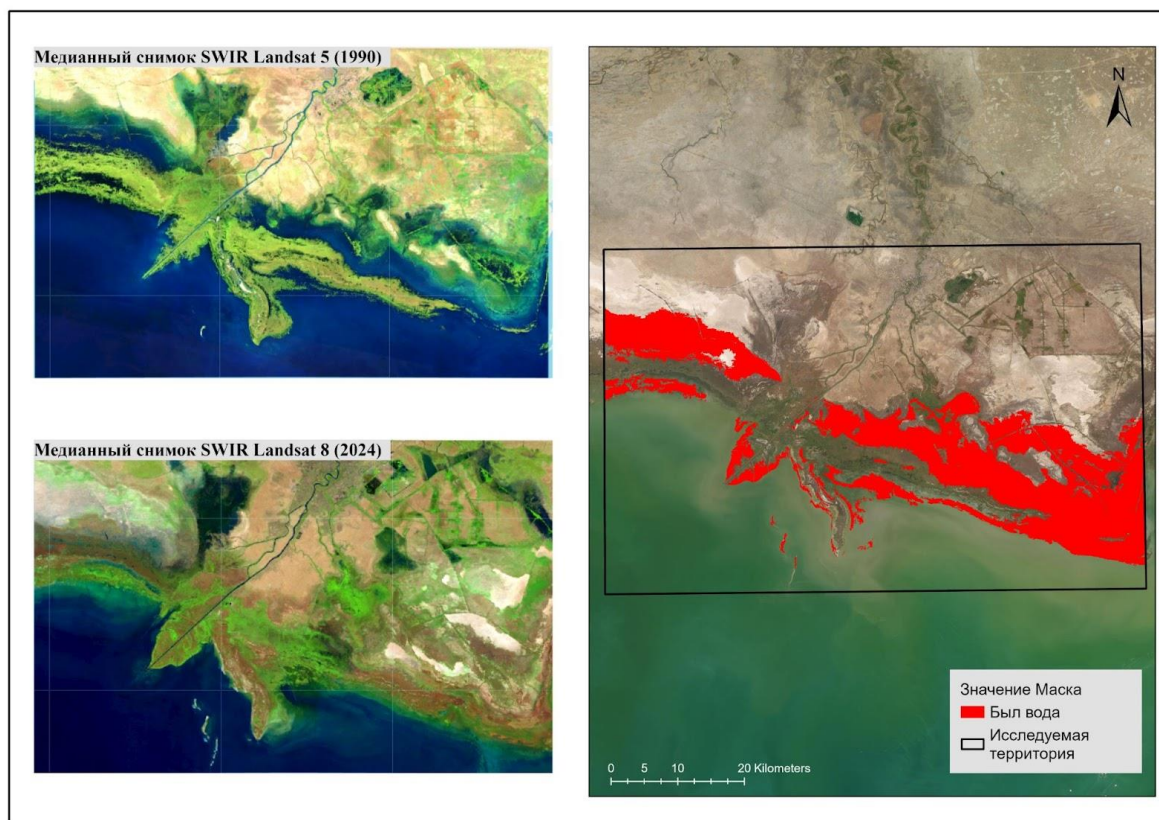


Рисунок 3.31 - Карта для анализа изменений береговой линии на основе изображений Landsat.

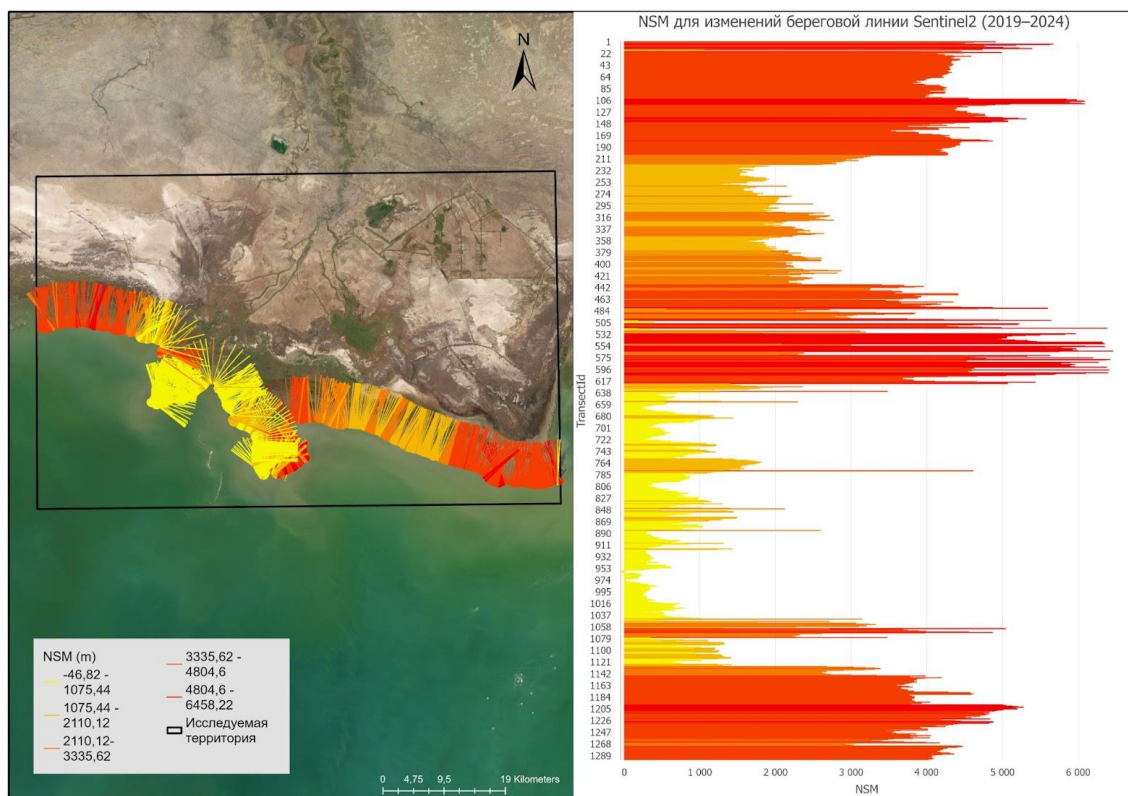


Рисунок 3.32- Результаты анализа изменений береговой линии района Атыраус использованием Sentinel-2 на основе DSAS (2019–2024), изменение береговой линии с графиком

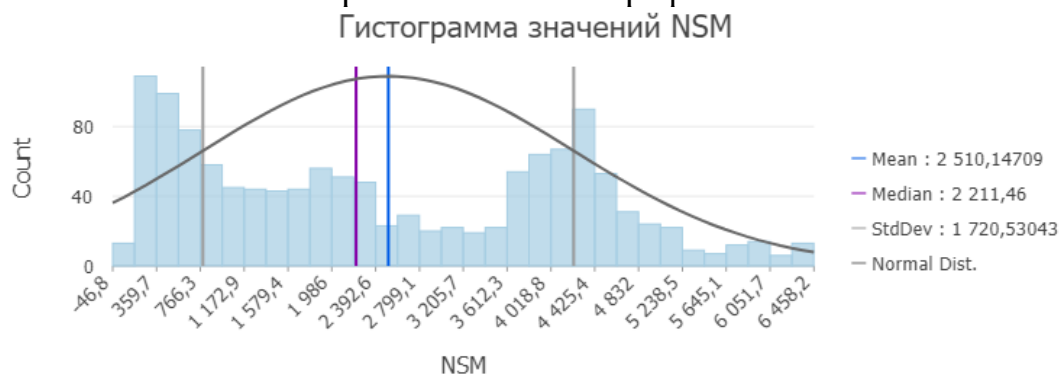


Рисунок 3.32- Гистограмма значений NSM город Форт-Шевченко с использованием Sentinel-2 на основе DSAS (2019–2024)

в)

$$y = 20,992530019 + 0,9776507399 x$$

$$R^2 = 0,9848923774$$

ВЫВОДЫ ПО 3 ГЛАВЕ

В рамках данного исследования разработана и апробирована методология автоматизированного извлечения береговой линии на основе платформы Google Earth Engine (GEE) с применением методов пороговой обработки и машинного обучения. Использование индекса автоматического извлечения воды (MNDWI) в сочетании с методом пороговой обработки по Отсу обеспечило надежное разделение водных и наземных объектов на спутниковых снимках Landsat.

Включение алгоритмов неконтролируемой кластеризации K-means и контролируемой классификации Random Forest при обработке данных Sentinel-2 позволило получить высокоточную картографическую информацию о динамике береговой линии.

Результаты исследования подтвердили эффективность метода K-means для извлечения береговой линии, продемонстрировав его вычислительную устойчивость и способность выявлять пространственные изменения без необходимости использования размеченных обучающих данных. Пространственное разрешение 10 м Sentinel-2 обеспечило более детализированное отображение береговой линии по сравнению с разрешением 30 м Landsat.

Применение статистического анализа береговой линии (DSAS) позволило количественно охарактеризовать пространственно-временные изменения в трех районах исследования: Актау, Атырау и Форт-Шевченко,

выявив значительные процессы эрозии и аккреции. Анализ показал, что наибольшая аккреция наблюдается в регионе Атырау, где среднее значение NSM составило 2510 метров за последние шесть лет на основе данных Sentinel-2.

Усовершенствованный подход демонстрирует высокий потенциал для многолетнего мониторинга береговой зоны и может быть адаптирован для анализа береговой динамики в различных прибрежных регионах. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию дополнительных спектральных и топографических данных, а также совершенствование алгоритмов машинного обучения с целью повышения точности классификации береговой линии и учета сезонных колебаний.

Глубокое обучение (Deep Learning) позволяет анализировать большие объемы данных, таких как спутниковые изображения, временные ряды, географические данные

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствие с целью докторской диссертацией и поставленными задачами был выполнен:

- обзор и анализ мониторинга береговой линии водных объектов с помощью данных ГИС, основанный на использовании данных традиционного метода, современных данных дистанционного зондирования Земли, а также инструментальных наблюдений. Полученные данные со снимков дают возможность прогнозировать возможных последствий экологических и экономических бедствий. Традиционная наземная съемка известна как важный метод картографирования береговой линии, но передача информации от наземной съемки до карт береговой линии всегда требует много времени и денег. В пользу большого охвата, своевременности, динамичности и низкой стоимости, удаленности зондирование становится широко используемым методом для пространственно-временного картографирования и обнаружения изменения береговой линии;

- Выполнен анализ спутниковых данных, с высоким пространственным разрешением, которые позволили достичь высокой точности, при мониторинге береговой линии. Согласно исследованиям, приобретение снимков с высоким пространственным разрешением дорого, а

нечастые повторные посещения затрудняют выделение береговой линии на большой территории. Тем самым спутниковые данные среднего пространственного разрешения, особенно серии Landsat, Sentinel широко применимы в задачах определения береговой линии благодаря свободному доступу, долгосрочным данным, а также большому охвату;

- Проведен сравнительный анализ водных индексов которые позволяют выделить водные объекты (реки, озера, искусственные водохранилища) на земной поверхности.

- Проведен расчет индексов радиометрической и атмосферной коррекции, позволяющие учесть условия во время съемки и скорректировать интервал яркости получаемого изображения.

- Результаты обработки данных показали, что наилучшим водным индексом является MNDWI среди WRI, NDMI, NDWI, NDVI, что показывает визуальный анализ водных масок и результаты оценки точности. Приведены водные маски для каждого индекса. Мониторинг береговой линии, полученный фотограмметрическим способом, имеет соответствующее качество, так как данные покрывают всю необходимую территорию и корректно передают информацию о водном ресурсе, также цифровая фотограмметрическая технология является одним из наиболее эффективных способов. Внедрение позволит значительно сократить, упростить, многие виды традиционных геодезических и картографических измерений. Использование полученных данных повысит точность данных, сократит сроки получения необходимых материалов, и понизит стоимость на продукцию.

- Усовершенствованна методика мониторинга береговой линии с использованием метода машинного обучения. Машинный метод демонстрирует высокий потенциал для многолетнего мониторинга береговой зоны и может быть адаптирован для прогнозирования и динамики изменения береговой линии в различных прибрежных регионах.

- Исследования могут быть направлены на интеграцию дополнительных спектральных и топографических данных, а также совершенствование алгоритмов машинного обучения с целью повышения точности классификации береговой линии и учета сезонных колебаний;

Данный способ позволяет получить выходные материалы как в графическом, так и в цифровом виде. Использование ГИС-технологий для сбора и хранения полученной информации в единой базе данных позволяет выполнять своевременный геопропространственный анализ всей исследуемой территории. Обмен данными с использованием глобальных и локальных сетей обеспечивает эффективную организацию и управление работами на объектах, а также предоставляет возможность выполнять экологический прогноз и оценку прилегающей территории.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев Д.В., Завьялов А.А., Розенберг Е.Ю., Минеева О.К., Минеев В.С., «Современные технологии сохранения биоресурсов Каспийского моря», Каспий XXI века: пути устойчивого развития, 2020, с. 126-131.
2. Малинников В.А., Стеценко А.Ф., Алтынов А.Е., Попов С.М. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Изд. МИИГАиК. 2008 г., 145 с.
3. Альжанова А.М., «Экологические проблемы Казахстана», Общество, 2022, с. 63-67.
4. Шарова И.С., Утегалиев Р.М., «Экологическое состояние водных ресурсов Каспийского моря и их рекреационное использование», Туризм и рекреация: инновации и ГИС-технологии, 2019, с. 167-171.
5. Закарин Э.А., Балакай Л.А., Дедова Т.В., «Моделирование гидродинамики Северного Каспия», Наука, 2006, с. 92-96.
6. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А., «Каспийское море: экстремальные гидрологические события», Наука, 2007, с. 381.
7. **Технический проект.**
8. Дуйсебаев Ж.Д., Кожахметов Б.Т., Парамонова Г.А., «Современное состояние нефтегазовых объектов прибрежной зоны

аккумулятивных равнин Северо-восточного Прикаспия», Известия НАН РК, 2007, с. 55-63.

9. Израэль Ю.А., Цибань А.В. Антропогенная экология океана. – М.: Флинта: Наука, 2009, – 529 с.

10. Ручевская И., Митрофанов И., Гучгельдиев О., Емилин В., Крутов А., «Каспийское море состояние окружающей среды», Доклад временного Секретариата Рамочной конвенции по защите морской среды Каспийского моря и бюро управления и координации проекта «КАСПЭКО», 2011, с. 109.

11. Скольская Е.А., Уваров В.Н., «Некоторые особенности колебания уровня моря в Северном Каспии в XXI веке», Материалы Международной научной конференции «Изменение климата в регионе Каспийского моря», 2022, с. 262.

12. Зонн И.С., «Очерки по истории изучения Каспийского моря (с древнейших времен до начала XXI века)», Сов. спорт, 2005, с. 6-14.

13. Крутов А., Куртубадзе М., «Каспийское море, состояние окружающей среды», доклад Временного Секретариата Рамочной конвенции по защите морской среды Каспийского моря (Тегеранской конвенции, 2019, с. 148.

14. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А., «Каспийское море экстремальные гидрологические события», Наука, 2007, с. - 381.

15. Alimbayev T., Omarova B., Tuleubayeva S., Kamzayev B., Aipov N., Mazhitova Zh., «Ecological problems of water resources in Kazakhstan», E3S Web of Conferences 244, 2011, с. 11.

16. Dyakonov G., Ibrayev R., «Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model», Ocean.Science 15, 2019, с. 527-541.

17. Kenzhegaliyev A., Kanbetov A., Kulbatyrov D., Shakhmanova A., Abilgazyieva A., «Fluctuations in the level of the Caspian Sea and its consequences», E3S Web of Conferences 288, 2021, с. 4.

18. Тюменев С.Д., «Водные ресурсы и водобеспеченность территории Казахстана», Учебник– Алматы: КазНТУ, 2008. – 267 с.

19. Гусейнова С.А., Абдусамадов А.С., «Прогноз динамики уровня Каспийского моря и ее последствия для прибрежных территорий», Геоэкология 10, 2015, с. 119-125.

20. «Kazakhstan National Report», Convention on Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes, Seminar on the role of ecosystems as water suppliers (Geneva, 13-14 December 2004).

21. «Генеральная схема комплексного использования и охраны водных ресурсов Республики Казахстан». ПК. Ин-т Каз. Алматы, 2016.

22. Mukasheva M.A., Nurlybaeva K.A., Arymbekova A.K., Starikov A.E., «Regional factors of resolution of environmental problems in Karaganda region», International Journal of Applied and Fundamental Research 1-1, 2017, с. 85–88.

23. Сиваков Д.О., «Водное право: учебно-практическое пособие», Litres, 2022, с. 329.
24. Thuillier O., Josse N., Olteanu A., Sevaux M., Tanguy H., «Catalogue of coastal-based instances with bathymetric and topographic data», Earth Syst. Sci. Data (16), 2024, с. 4529–4556.
25. Bass S., Fowler C., Bierman B., Esch G., «Marine Managed Areas: Best practices for boundary making», Marine Boundary Working Group Federal Geographic Data Committee, 2006, с. 66.
26. Takhtkeshha N., Mandlbürger G., Remondino F., Hyypä J., «Multispectral Light Detection and Ranging Technology and Applications: A Review», Sensors (Basel) 24(5), 2024, с. 30.
27. Shan J., Hyypä J., «Advances in airborne LIDAR systems and Data processing», MDPI RemoteSensing, 2018, с. 495.
28. Suzanne P., «Development of a LIDAR Derived Digital Elevation Model (DEM) as input to a METRANS Geographic Information System (GIS)», METRANS Project AR 05-04, 2011, с. 36.
29. «NOAA Coastal Change Analysis Program (c-cap): Guidance for regional implementation», NOAA Technical Report NMFS 123, Department of Commerce, 2003, с. 140.
30. Елбаева А.Т., «Опыт Казахстана по формированию статистики водных ресурсов», доклад Комитета по статистике Министерства экономики РК, 2015.
31. Карабаева А.Ж., «Дистанционное зондирование водных объектов в Казахстане», Аллея Науки 11(27), 2018, с. 206-209.
32. Токарева О.С., «Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования земли: учебное пособие», изд-во Томского политехнического университета, 2010, с. 148.
33. Jafarbiglu H., Pourreza A., «A comprehensive review of remote sensing platforms, sensors and applications in nut crops», Computers and Electronics in Agriculture 197, 2022, с. 23.
34. Merlin F., «Validation of ocean color remote sensing reflectance data: Analysis of results at European coastal sites», Remote Sensing and Environment 280, 2022, с. 20.
35. Jaywant S., Arif K.M., «Remote Sensing techniques for water quality monitoring: a review», Sensors 24 (24), 2024, с. 31.
36. Хремли Г.П., Левитская Т.И., Казаченко Н.А., «Геодезическое инструментоведение», методические указания кафедры астрономии и геодезии, 2011, с. 203.
37. Shridahar D.J., Somashekhar S.V., Alvarinho J.L., «A Synoptic Review on Deriving Bathymetry Information Using Remote Sensing Technologies: Models, Methods and Comparisons», Advances in Remote Sensing 4, 2015, с. 147-162.
38. Szafarczyk A., «The Use of Green Laser in LiDAR Bathymetry: State of the Art and Recent Advancements», Sensors 23(1), 2023, с. 292.

39. Lee J., Jung D., Baek J., Lim H., «Estimate of Coastal water depth based on Aerial photographs using a low-altitude remote sensing system», *Ocean science* 54(3), с. 349-362.
40. Acker J., Williams R., Chiu., Ardanuy P., «Remote Sensing from satellites», *Reference module in Earth systems and Environmental Sciences*, 2014, с.161-202.
41. Liu Y., Wang X., «Analysis of Coastline Extraction from Landsat 8 OLI Imagery», *Water* 9(11), 2017, с. 26.
42. Liu Y., Wang X., Xu S., Ling F., « Fine spatial resolution coastline extraction from Landsat-8 OLI imagery by integrating downscaling and pansharpening approaches», *Remote Sensing Letters* 9(4), с. 314-323.
43. Greeta P., Ishfaq H., Raj A., Sushil K.«Image quality assessment of multi-satellite pan-sharpening approach: A case study using sentinel-2 synthetic Panchromatic image and Landsat 8», *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems* 11(6), 2024, с. 10.
44. Елтай А.Г., Базарбай Л.Б., Шишкина Г.М., «Обзор данных ДЗЗ о волновых процессах Казахстанской части Каспийского моря», *Гидрометеорология и экология*, (3), 2023, с. 52–59.
45. Земцова А.В., «Геодезические исследования геодинамических процессов», Учебное пособие – Алматы: КазНТУ, 2014, с. 205.
46. Атрошко Е.К., Дралова И.П., Куновская Г.М., Сырова Н.С., «Инженерная геодезия и фотограмметрия», учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных и расчетно-графически работ, 2021, с. 105.
47. Приказ Министра цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан от 16 марта 2023 года № 94/НК, «Об утверждении Инструкции по нивелированию».
48. «Основные положения о государственной геодезической и нивелирной сетях Республики Казахстан» ГКИНП (ГНТА)-01-020-09, от 15/12/2009.
49. Мейрамбек Г., Рахимбаева Д.Ж., Рысбеков К.Б., Ержанкызы А., «Мониторинг изменения береговой линии Каспийского моря методом водного индексирования на основе геопространственных данных», *Горный журнал Казастана* №11, 2024, с. 23-31.
50. Khan S., Mohiuddin K., «Evaluating the parameters of ArcGIS and QGIS for GIS applications», *International Journal of Advanced Research in Science and Engineering* 07 (03), 2018, с. 582 – 594.
51. Омиржанова Ж.Т., «Разработка тематической карты в программном обеспечении ArcGis», *Электронное учебное пособие*, 2016, с. 4-66.
52. Agoha C.C., Onwubuariri C.N., Mgbeojedo T.I., «Review of Spatial Analysis as a Geographic Information Management tool», *American Journal of Engineering and Technology Management* 9(1), 2024, с. 8-20.
53. McCoy J., Johnston K., Kopp S., «ArcGIS 9», *Using ArcGIS Spatial Analyst*, 2002, с. 238.

54. Ципилева Т.А., «Геоинформационные системы», учебное пособие ТУСУР, 2010, с. 2010.
55. Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С, «Оперативное океанографическое обслуживание», Обнинск: «ИГ-СОЦИН», 2009, с. 288.
56. Катаев М.Ю., Бекеров А.А., «Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым изменениям», доклады ТУСУРа №4, 2017, с. 105-108.
57. Росяйкина Е.А., Ивлиева Н.Г., «Обработка данных дистанционного зондирования Земли в ГИС-пакете ArcGIS», Прочие Технологии, 2015, с. 9.
58. Elander M., Gunnarsson P., «Generating an information security classification model for satellite imagery and geographical information», Department of Computer and Information Science, 2022, с. 62.
59. Куртушин Н.А., Чупин С.Ю., «Применение спутниковых данных «LANDSAT» в задачах дистанционного зондирования Земли», Проект ГПО АСУ-1306 Обработка спутниковых данных, с. 5.
60. Irons J.R., Dwyer J.L., Barsi J.A., «The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission», Remote Sensing of Environment 122, 2012, с. 11-21.
61. Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я., Савиных В.П., «Применение данных LANDSAT 8 при изучении природных комплексов», Экология родного края: проблемы и пути их решения, 2017, с. 19-22.
62. Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R., « LANDSAT 8: Science and product vision for terrestrial global change research», Remote Sensing of Environment 145, 2014, с. 154-172.
63. Шихов А.Н., Герасимов А.П., «Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения», учебное пособие ПГНИУ, 2020, с. 191.
64. Евдокимов С.И., Михалап С.Г., «Определение физического смысла комбинации каналов снимков Landsat для мониторинга состояния наземных и водных экосистем», Естественные и физико-математические науки, 2015, с. 21-32.
65. Рахимбаева Д.Ж., Кыргызбаева Г.М., Шоганбекова Д.А., Нурпейсова Т.Б., Юсупов Х.А., «Исследование методики мониторинга береговой линии по данным дистанционного зондирования Земли», «Известия РОО «НАН РК». Серия геологии и технических наук» 6 (462), с. 159-173.
66. Thissen J.J.M., «Automating surface water detection for rivers. The estimation of the geometry of rivers based on optical earth observation sensors», Deltares. Enabling Delta Life, 2019, с. 84.
67. Долгополов Д. В., «Методика обнаружения водных объектов в зоне трубопроводов при паводках по данным космического мониторинга», Мониторинг. Наука и Технологии, 2021, с. 75-83.

68. Jiang W., Ni Y., He G., Fu J., «A new index for identifying water body from Sentinel-2 satellite remote sensing imagery», *ISPRS: Remote sensing and Spatial Information Science* Vol.3, 2020, с. 33-38.
69. Xu H., «Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery», *International Journal of Remote Sensing* 27(14), 2006, с. 3025-3033.
70. Lei J., Li Z., Wyile B., «Analysis of dynamic thresholds for the Normalized Difference Water Index», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 75 (11), 2009, с. 1307-1317.
71. Rad. A., Kreitler J., Sadegh M., «Augmented Normalized Difference Index for improved surface water monitoring», *Environmental Modelling and Software*, vol. 140, 2021.
72. Наурозбаева Ж.К., «Оценка воздействия атмосферной циркуляции на ледовый режим и уровень Каспийского моря», *Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов* 10(1), 2024, с. 68-90.
73. Федорян А.В., «Применение технологий ГИС в природообустройстве и водопользовании», учебное пособие Директ-Медиа, 2022, с. 192.
74. Srivatsava N., Saxena N., «Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning in Geospatial Data», *Emerging Trends, Techniques, and Applications in Geospatial Data Science*, 2023, с. 196-219.
75. Marsia A., Abouelsaad O., «Artificial Intelligence applications in coastal engineering and its challenges – a review», *Continental Shelf Research*, vol. 286, 2025.
76. Rogers M., «Machine learning and remote sensing applications to shoreline dynamics», thesis University of Cambridge, 2021, с. 265.
77. Xie G., «Machine Learning methods and Land Use/Land Cover (LULC) in the coastal Pays de Brest», *Université de Bretagne occidentale*, 2023, с. 350.
78. Zhang X., Zhou Y., «Deep learning for processing and analysis of remote sensing big data: a technical review», *Big Earth Data*. Vol. 6 (4), 2022, с. 527-560.
79. Seale C., Redfern T., Chatfield P., Luo C., «Coastline detection in satellite imagery: A deep learning approach on new benchmark data», *Remote Sensing of Environment*, vol. 278., 2022.
80. Khornina S., Kazansky N., Oseledets I., Nikonorov A., «Synergy between Artificial Intelligence and Hyperspectral Imaging—a review», *Technologies*, 12(9), 2024, с. 163.
81. Shamsolmoali P., Zareapoor M., Wang R., Zhou H., «A novel deep structure U-NET for Sea-Land Segmentation in remote sensing images», *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 99, с. 1-14.

82. Wang C., Shu Q., Wang X., Guo B., «A random forest classifier based on pixel comparison features for urban LIDAR data», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 148, 2019, c. 75-86.
83. Sakun S., Wevers J., Brockmann C., Doxani G., «Cloud Mask Intercomparison eXercise (CMIX): An evaluation of cloud masking algorithms for Landsat 8 and Sentinel-2», *Remote Sensing of Environment*, vol. 274, 2022, c. 1-22.
84. Safarov E., Safarov S., Bayramov E., «Changes in the Hydrological Regime of the Volga River and their influence on Caspian Sea level fluctuations», *Water*, vol. 16(1744), 2024, c. 19.
85. Jamshidi S., «Flow measurement in the southern coast of the Caspian Sea», *Frontiers in Marine Science*, 2024, c. 20.
86. Дирекция региональных программ КИСИ, «Каспий: предотвратить надвигающуюся экологическую катастрофу», экспертный доклад Каспийский Институт Стратегических исследований, 2024.
87. Kalugin A., «Hydrological and Meteorological Variability in the Volga River Basin under Global Warming by 1.5 and 2 Degrees», *Climate* 10(7), 2022, c. 23.
88. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., «Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone», *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, 2017, c. 18-27.
89. Wang. W., «Automatic extraction of coastline based on Google Earth engine», *International Journal of Computer Science and Information Technology*, vol 1(1), 2023, c. 102-111.
90. Spatial Thoughts, «Automated Coastline Extraction from Satellite Images using Google Earth Engine», *Spatial Thoughts Article*, 2023.
91. Mustafa, M. T., Hassoon K. I., Hussain H. M., Abd M. H., «Using water indices (NDVI, MNDWI, NDMI, WRI and AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and GIS techniques», *International Journal of Research-Granthaalayah*, vol. 5(10), 2017, c.117-128.
92. Zhou X., Wang J., Zheng F., Wang H., Yang H., «An Overview of Coastline Extraction from Remote Sensing Data», *Remote Sensing*, vol. 15(19), 2023,
93. Paradis E., «Probabilistic unsupervised classification for large-scale analysis of spectral imaging data», *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, vol. 107, 2022, c. 13.
94. Breiman, L., «Random forests», *Journal Machine Learning*, vol. 45(1), c.5-32.
95. Belgiu, M., Drăguț, L., «Random Forest in remote sensing: A review of applications and future directions», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 114, 2016, c. 24-31.
96. Pepe M., Costantino D., Alfio V.S., «A GIS Procedure to assess shoreline changes over time using multi-temporal maps: an analysis of a Sandy shoreline in Southern Italy over the last 100 years», *Geomatics and Environmental Engineering* 17(3), 2023, c. 107-134.

97. Himmelstoss E.A., Henderson R.E., Farris A.S., Kratzmann M.G., Bartlett M.K., Ergul A., McAndrews J., Cibaj R., Zichichi J.L., Thieler E.R., «Digital Shoreline Analysis System version 6.0», U.S. Geological Survey software release, 2024.

98. Murray J., Adam E., Woodborne S., Miller, D., Xulu S., Evans M., «Monitoring Shoreline Changes along the Southwestern Coast of South Africa from 1937 to 2020 Using Varied Remote Sensing Data and Approaches», Remote Sensing, 15(2), 2023, c. 20.