

УБОВИЧ Станка

Выпускная квалификационная работа

«Пространственный анализ гидрогеохимических характеристик устьевой области с помощью ГИС на примере дельты реки Лены»

Уровень образования: магистратура

Направление *05.04.04 «Гидрометеорология»*

Основная образовательная программа *ВМ.5779.2020 «Гидросфера и атмосфера: моделирование и прогноз»*

Научный руководитель:
доцент, кафедра гидрологии суши,
к.г.н. Пряхина Галина Валентиновна

Научный консультант:
старший преподаватель, кафедра гидрологии суши
Четверова Антонина Александровна

Рецензент: научный сотрудник,
отдел мониторинга поверхностных вод и экспедиционных исследований,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный гидрологический институт»
Скороспехова Татьяна Викторовна

Санкт-Петербург

2022

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Современное состояние проблемы исследования.....	4
1.1. Объект исследования.....	4
1.2. Пространственное распределение природных характеристик с помощью ГИС.....	10
1.3. Обзор существующих методов фракционирования речного стока.....	10
Глава 2. Материалы и методы исследования.....	14
2.1. База данных.....	14
2.2. Создание ГИС дельты реки Лены.....	16
2.3. Описание алгоритма модели ЕММА.....	18
2.4. Статистический анализ гидрохимических данных.....	22
2.5. Выявление гидрохимических трассеров формирования речного стока.....	25
2.5. Определение долей вклада генетических источников в речной сток.....	28
Глава 3. Результаты исследования.....	32
3.1. Результаты проведенного исследования.....	32
3.2. ГИС дельты реки Лены.....	32
3.3. Результаты статистического анализа гидрохимических данных.....	35
3.4. Генетические составляющие речного стока и их вклад.....	37
3.5. Анализ полученных результатов.....	41
Заключение.....	43
Список литературы.....	45

Введение

Выпускная квалификационная работа посвящена анализу гидрохимических данных, полученных в результате экспедиционных исследований в дельту реки Лены. Также в рамках работы рассматривается, одна из классических задач гидрологии, а именно определение генетических составляющих речного стока. Для исследования механизма стокоформирования проводится исследование взаимодействий вод из различных источников.

При работе с данными важно понимать их пространственное распределение и динамику. В этом исследователям помогают географические информационные системы (ГИС), которые значительно упрощают процесс работы с данными и их восприятие. Поэтому создание ГИС является важной частью исследования, связанного с пространственными данными.

В качестве объекта исследования была выбрана дельта реки Лены, что обусловлено возрастающим интересом к изучению арктического региона.

Цель работы заключается в проведении анализа данных гидрохимических наблюдений и распределения долей вклада генетических составляющих в формирование речного стока в дельте реки Лены в летний период.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести обзор литературных источников по теме работы;
- провести статистический анализ гидрохимических данных, собранных в базе «Lena Delta Hydrogeochemistry» (Четверова и др., 2019);
- определить генетические составляющие речного стока в дельте реки Лены в летний период и рассчитать вклад каждого из них в речной сток;
- визуализировать результаты расчетов, провести их пространственный анализ и анализ гидрохимических характеристик дельты реки Лены.

В итоге предполагается получить результаты статистического анализа гидрохимических данных. Представить пространственное распределение характеристик с помощью ГИС.

Глава 1. Современное состояние проблемы исследования

1.1. Объект исследования

Объектом исследования выпускной квалификационной работы является дельта реки Лены.

Данный район представляет большой интерес для исследователей. В дельту Лены регулярно совершаются различные экспедиции, что обуславливает наличие данных наблюдений по данному региону и возможность их использования для достижения поставленных перед автором работы задач.

- Гидрографическая характеристика дельты реки Лены

Дельта реки Лены (рисунок 1), находящаяся в Восточной Сибири, одна из крупнейших арктических дельт. Площадь дельты Лены составляет около 32 тысяч км², что делает ее крупнейшей дельтой на территории России. Протяженность дельты в среднем составляет 150 км. Она имеет очень разветвленную и сложную гидрографическую сеть, которая содержит большое количество протоков и озер. На территории дельты расположено около 59 тысяч озер с общей площадью около 3 тысяч км² и около 6 тысяч водотоков, общая длина которых составляет более 14 тысяч км, а также более 1600 островов. Значение густоты русловой сети на востоке дельты составляет 0,34 км/км², а на западе – 0,13 км/км². В качестве основных протоков можно назвать Быковскую, Булкурскую, Оленекскую, Трофимовскую и Туматскую. За вершину дельты принимают место ответвления Булкурской протоки, которая является первым левым рукавом дельты (Алексеевский и др., 2014).

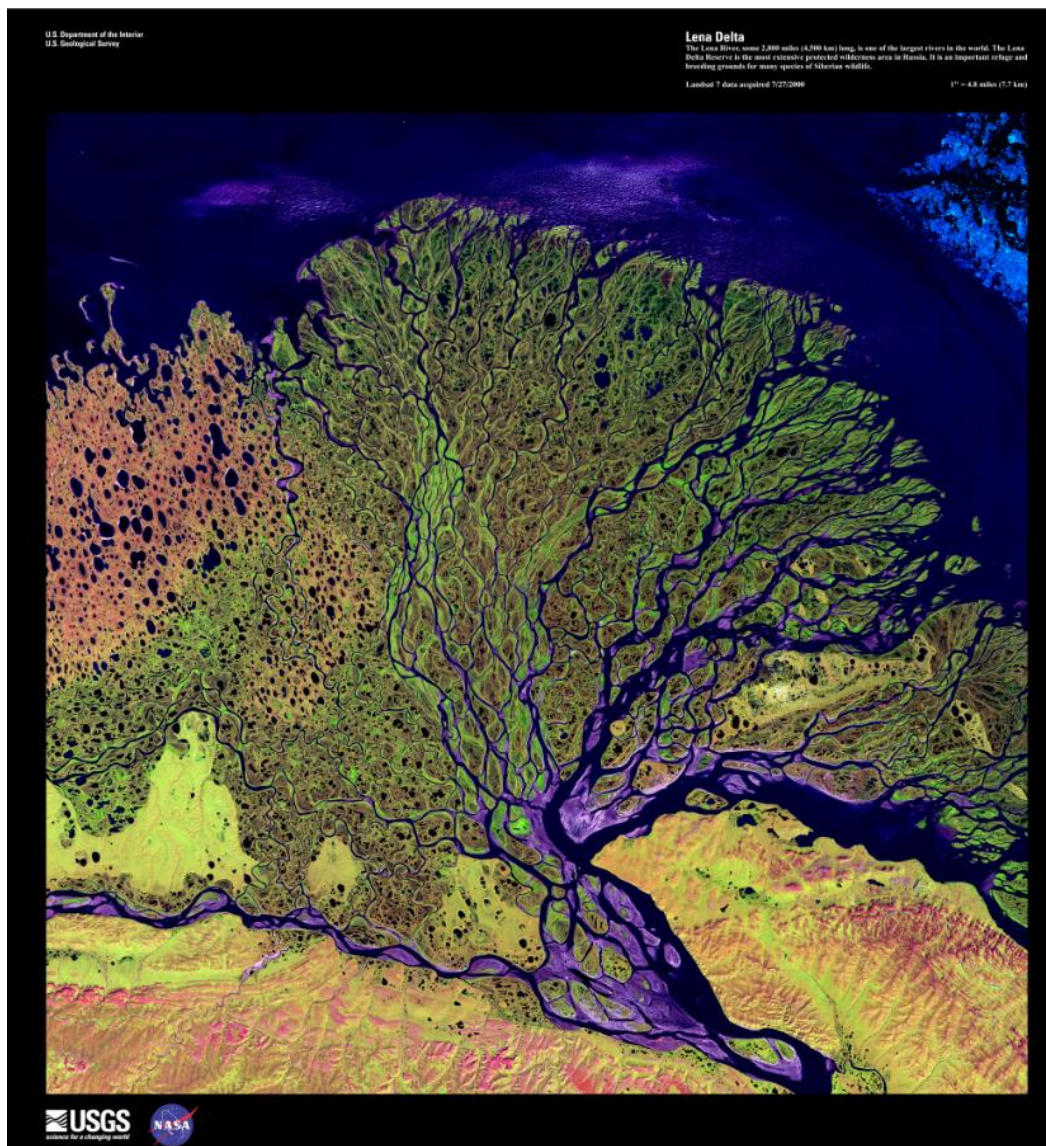


Рисунок 1. Космический снимок дельты р. Лены (2000-02-27 Landsat 7)
(<https://www.usgs.gov/media/images/lena-delta>)

- Геолого-геоморфологическое описание

Дельта Лены ограничена с юго-запада кряжем Чекановского, а с востока – Хараулахским хребтом, северной окраиной системы Верхоянского хребта, с остальных сторон окружена морем Лаптевых, в которое впадает река (Коротаев, 2011).

Территория дельты является равнинной, для нее свойственен однообразный пологоволнистый рельеф (Водно-болотные угодья..., 2000).

В районе расположения дельты реки Лены происходит сочленение древней сибирской платформы с мезозойской Лаптевоморской плитой. Эти геоблоки разделяет сегмент Верхоянской складчатой системы. Для дельты характерно преобладание четвертичных систем (Имаева и др., 2019).

Аллювиально-дельтовый комплекс в устьевой области реки Лены сформировался на взморье, которое является открытым и относительно отмелым. Дельта Лены формировалась на протяжении длительного периода. На рисунке 2 представлены этапы формирования дельты реки Лены. Для нее характерно достаточно сложное строение, которое получилось из-за того, что в данном районе были широко развиты древние останцовые массивы, которые сложены едомным комплексом рыхлых плейстоценовых отложений или же коренными породами девона (Коротаев, 2011).

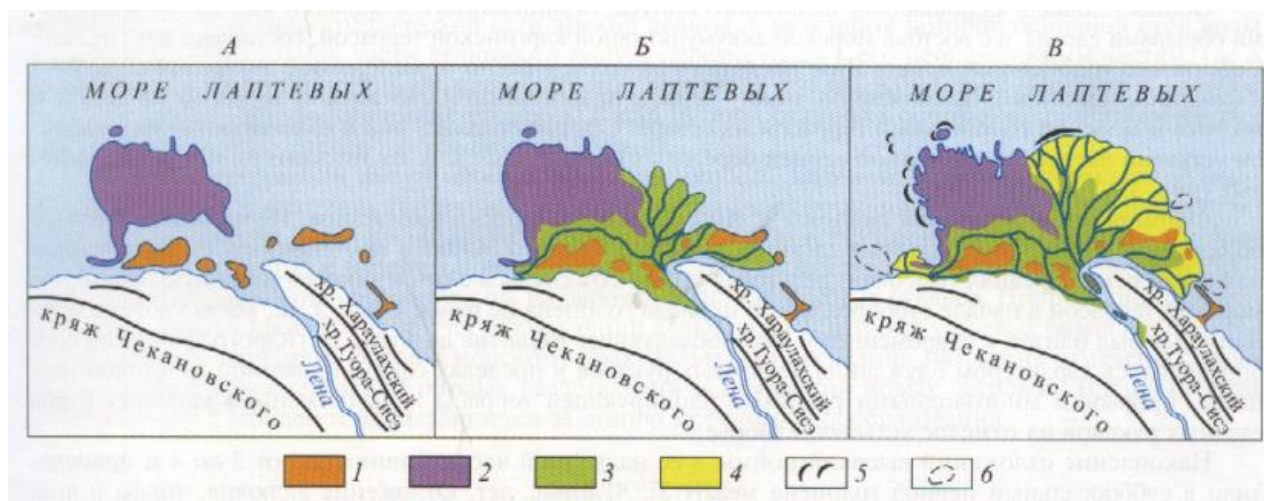


Рисунок 2. Схема формирования дельты реки Лены.

А – приустьевой залив в максимальную фазу послеледниковой трансгрессии; Б – старая дельтовая пойма и формирование дельт заполнения (Быковской, Оленекской, Арынской) и выдвижения (Трофимовской, Сардахской) 4-5 тыс. л. н.; В - современный этап формирования дельт выдвижения (менее 1000 лет). 1 – морская (каргинская) терраса; 2 – озерно-аллювиальная равнина (едома); 3 – старая дельтовая пойма; 4 – молодая дельтовая пойма; 5 – современные береговые бары; 6 – устьевые бар (Коротаев, 2011).

На территории дельты Лены распространены такие останцовые образования, как ледовый комплекс или едомный комплекс, например, ледовые комплексы на островах Курунгнах и Собо-Сисэ. По одной из теорий ледовый комплекс формировался во время колебаний уровня моря, приведшего к промерзанию бассейновых остатков и формированию останцов. (Большаянов и др., 2013; Кандратюкова, 2014.). Однако, наиболее распространённым и общепринятым в мировой научной среде является мнение о слиянии повторно-жильного льда (Siegert et al., 2009).

- Почвы и растительность

На территории дельты располагаются зоны арктической и типичной (субарктической) тундры (Алексеевский и др., 2016).

Тундра представляет собой безлесные, заболоченные территории. Для арктической тундры характерна преимущественно травянистая несомкнутая растительность (осоко-пушицевая, а также мхи и подушкообразные формы растений, например, камнеломка), болота, бугры пучения, озера. Для субарктической тундры характерны участки мхов, чередующихся с лишайниками. Появляются стелящиеся виды растений, например, карликовые березы и ивы (Ресурсы ..., 1972; Большая российская..., 2016).

Самыми распространенными типами почв территории дельты Лены являются мерзлотные тундровые перегнойно-глеевые и перегнойно-глееватые (Водно-болотные угодья..., 2000).

- Климат

Район дельты Лены относится к арктическому климатическому поясу, который характеризуется коротким, прохладным летом и продолжительной морозной зимой. Для него характерно наличие полярного дня, который начинается в середине мая и продолжается до начала августа. Поэтому в период с июня по август радиационный баланс является максимальным (Исупова и др., 2013; Водно-болотные угодья..., 2000).

Среднегодовая температура воздуха составляет около -13°C . Средние значения температуры воздуха в январе достигают значений менее чем -30°C , в июле – около $4-8^{\circ}\text{C}$. Количество выпадающих осадков примерно 250-300 мм в год. Основная часть осадков выпадает в период с апреля по октябрь. Относительно небольшое количество зимних осадков ведет к промерзанию почв на большую глубину. Продолжительность безморозного периода около 40-60 дней. Уже в конце сентября происходит формирование устойчивого снежного покрова, который начинает разрушаться в последней декаде мая, а полный сход происходит в июне. Различия в сроках может достигать одному месяцу. Снегопады могут наблюдаться в течение всего года.

Также в районе дельты Лены наблюдаются сильные и продолжительные ветры. В апреле-августе для них характерно преобладание северного и северо-западного направления (Водно-болотные угодья..., 2000; Dolgopolova et al, 2021).

В связи с холодным климатом для дельты Лены характерны достаточно длительные ледовые явления. Их продолжительность может составлять срок до двухсот дней и выше. А толщина ледового покрова может достигать значений около 2 м и более. Вода начинает замерзать в сентябре – начале октября. Установление сплошного ледяного покрова на мелководных протоках и озерах происходит в начале октября, а на крупных в начале ноября. Вскрытие реки достигает дельты в середине мая – июня (Водно-болотные угодья..., 2000; Исупова и др., 2013).

При весеннем вскрытии реки могут происходить значительные заторы льда, которые могут вызывать повышение уровня воды на 5-10 м. А на протоках заторы не являются продолжительными и, так как вода и лед перераспределяются в смежные водотоки, они не могут привести к значительным подъемам уровня воды. В период половодья наблюдаются максимальные скорости течения и размыва. В этот период изменяются значения расходов и уровней воды, что приводит к русловым деформациям в протоках (Исупова и др., 2013).

Благодаря холодному арктическому климату в дельте Лены сохраняется сплошное распространение многолетней мерзлоты, а также наличие повторно-жильных льдов. Под руслом Лены, крупных рукавов, а также озер могут формироваться талики (Алексеевский и др., 2016).

Толщина непрерывного слоя мерзлоты около 500-600 м. А толщина активного слоя составляет около 30-50 см.

Возможные климатические изменения могут способствовать достаточно быстрому изменению гидрологических условий. Потепление климата может вызвать деградацию многолетних мерзлых пород в дельте Лены (Исупова и др., 2013).

- Водный режим

Для водного режима рек Восточной Сибири характерно высокое весеннее половодье, а также значительно уступающие ему по высоте подъема воды летние дождевые паводки воды. В зимнее время наступает период низкой межени, вплоть до прекращения стока. Таким образом, основной сток наблюдается в теплый период. Половодье наблюдается в дельте Лены с мая по июль. В июне и июле наблюдаются наибольшие значения стока. Вклад зимнего стока в его общий годовой объем составляет всего лишь несколько процентов.

Для рек Восточной Сибири, в том числе реки Лены, характерно преобладание снегового питания. Основным источником питания, который формирует речной сток, являются талые снеговые воды. На долю снегового питания приходится около 50-80% (Соколов, 1952).

Кроме того, для реки Лены значительную долю стока формируют дождевые воды, поступающие в реку во время летне-осенних паводков. Грунтовое питание для рек региона, как и для реки Лены незначительно. Оно может составлять всего лишь около 1-5% годового стока. Причиной этому является распространение многолетней мерзлоты, которая препятствует грунтовому питанию (Соколов, 1952).

Кроме того, многие авторы отмечают участи талых мерзлотных вод в формировании стока арктических и горных рек, расположенных в районах сплошного и островного распространения многолетнемерзлых пород (ММП).

По данным исследований влияние деградации мерзлоты в районах ее распространения может принимать значения где-то в районе 0-15% в зависимости от условий (Ma et al, 2019).

На рисунке 3 представлен гидрограф стока реки в ее замыкающем створе – гидрологическом poste (г/п) Кюсюр. Хорошо выраженный максимум, который наблюдается на гидрографе, происходит из-за климатических факторов и влияния многолетней мерзлоты. Так как снежный покров в данном регионе образуется на мерзлой почве, то, когда снег будет таять, талая вода сможет быстро поступить в речную сеть, что приведет к формированию высокого летнего паводка (Dolgopolova et al, 2021).

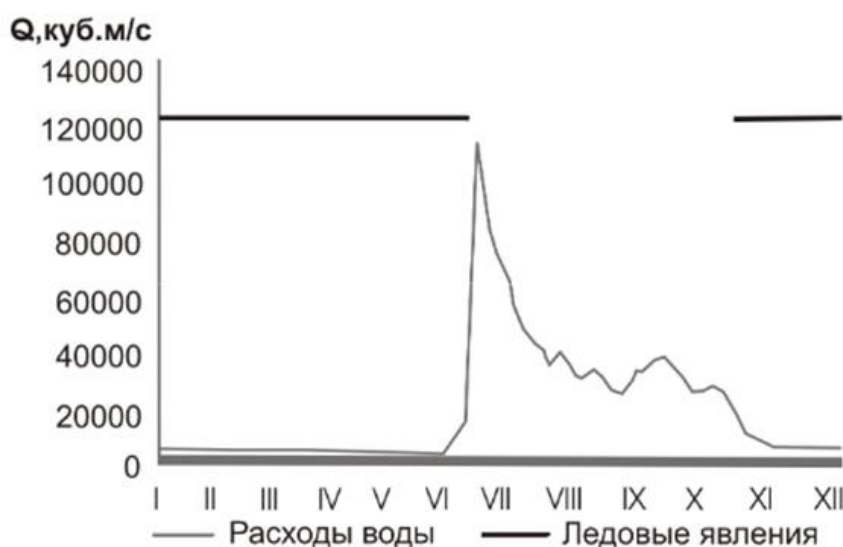


Рисунок 3. Гидрограф стока реки Лены – г/п Кюсюр (Четверова и др., 2011).

Средний многолетний расход воды на г/п Кюсюр за период с 1935 года по 2007 год составил 16900 м³/с или 533 км³/год. В период с 1936 года по 2007 год наблюдалось постепенное увеличение стока в вершине дельты и в наиболее крупных протоках (Исупова и др., 2013).

Для пространственного распределения характеристик речного стока характерно возрастание их величин от замыкающего гидрометрического створа до вершины дельты где-то на 1,9%, и последующее их уменьшение в результате того, что происходит рассредоточение стока по дельте.

Основная часть стока реки Лены поступает в Трофимовскую протоку – около 60%, затем часть стока распределяется между Сардахской и Большой Трофимовской, а также многочисленными боковыми протоками. На Быковскую протоку может приходиться около 25% стока. Тумацкая, Оленекская протоки получают около 7% стока реки на каждую.

В период половодья и летом во время паводков в реку поступает основная часть стока взвешенных наносов, составляющая более девяносто процентов (Алексеевский и др., 2014).

На режим уровней проток дельты Лены влияют колебания расходов воды в реке, а также приливы и нагоны в приморской части (Dolgopolova et al, 2021).

1.2. Пространственное распределение природных характеристик с помощью ГИС

Дельта Лены охватывает достаточно большую по площади территорию, участки которой имеют разную историю формирования, различные типы почв, растительного покрова и другие особенности. Для дельты характерна очень разветвленная и сложная гидрографическая сеть, характеризующаяся водотоками разного размера – от основных и самых крупных до небольших проток. Величина водотоков в целом уменьшается от вершины дельты к ее морскому краю в результате их разветвления (фуркации).

Такая пространственная неоднородность условий в дельте может влиять на распределение гидрогеохимических характеристик в дельте. Существование в дельте Лены объектов такого типа, как ледовый комплекс, также может оказывать влияние на распределение гидрогеохимических характеристик в пространстве. Поэтому для понимания, влияет ли разнообразие и неоднородность природных условий – ландшафтных особенностей, наличия активно деградирующих мерзлотных образований на формирование стока отдельных проток необходимо проведение анализа.

Для анализа неоднородности и особенностей пространственного распределения различных характеристик настолько массивного водного объекта как дельта реки Лены удобно использовать географические информационные системы (ГИС).

Географическая информационная система (ГИС) – представляет собой такую систему, в которой обеспечивается сбор, хранение, обработка, отображение и распространение пространственно-координированной информации. ГИС интегрирует данные и знания об исследуемой территории, что может быть использовано для решения различных научных и прикладных задач (Сербенюк, 1990).

1.3. Обзор существующих методов фракционирования речного стока

Существуют различные методы разделения речного стока на генетические составляющие. Их можно разделить на три группы. Численные и эмпирические, концептуальные методы, физические и химические (Сучкова, 2021).

Численные и эмпирические методы представляют собой обработку сигналов при изменении гидрографа речного стока. Они основываются на идее о то, что у поверхностного стока время добегания значительно меньше, чем у подземного стока, а величина времени является относительно постоянной в периоды между паводковыми явлениями. При

применении численных методов требуется провести настройку параметров. Параметрами могут являться временной интервал, коэффициенты линейных фильтров и другие. При настройке параметров необходимо учитывать рекомендации разработчиков и особенности каждого отдельного водосбора. Также к данным методам относятся методы, использующие нейронные сети. Эти методы не отражают реальные гидрологические процессы. К этой группе методов относятся и методы графического разделения гидрографа стока. При его использовании доля источника питания будет находиться с помощью использования значений соответствующих площадей на гидрографе. Величина вклада будет пропорциональна площади (Сучкова, 2021).

Концептуальные методы разделяют гидрограф в результате проведения анализа кривой спада или ресурсов, влияющих на изменение стока. Они основываются на представлении части водосборного бассейна как концептуального резервуара с оттоком в виде подземного стока. Используя закон об оттоке концептуального водохранилища, предположив, что значение его входящего стока будет равно нулю, получают кривую спада к следующему выпадению осадков. Количественный анализ спада включает в себя несколько этапов. Его начинают с выбора аналитического решения. Затем выводят характерную рецессию и оптимизируют ее параметры. Среди основных проблем данного метода отмечают высокую вариабельность рецессии различных стадий оттока (Сучкова, 2021).

В связи с труднодоступностью региона для исследований большую часть года, также наличием у автора работы и его коллег обширной базы данных для гидролого-геохимических характеристик проток дельты в летний период была предпринята попытка использования физико-химических методов с целью определения составляющих речного стока в дельте реки Лены.

Данная группа методов основывается на физико-химических различиях, которые определяют поступление вод из разных источников (Сучкова, 2021). При использовании этих методов общий сток принимают как смесь, состоящую из воды из различных источников имеющих разные характеристики. Что дает возможность использовать уравнения смешения для определения значения вклада источников питания. Под источниками питания (составляющие речного стока/компоненты смешения) принимаются различные по происхождению и свойствам водные массы, которые приурочены к основным ярусам водосборного бассейна, такие как: воды подземных горизонтов, склоновые или почвенные воды, атмосферные воды (Кичигина и др., 2016).

Методы данной группы имеют достаточную результативность. Из них наиболее широкое распространение получили те, которые для разделения стока используют трассер (Сучкова, 2021).

Трассерами могут быть различные химические компоненты природных вод, такие как: значения концентраций главных ионов, изотопов кислорода и водорода, микроэлементов, растворенное органическое вещество (Кичигина и др., 2016). Также в данную группу входят методы, которых используются такие параметры, как проводимость, водородный показатель (рН), температура (Сучкова, 2021).

К группе химических методов можно отнести разработанную в девяностых годах геохимическую модель смешения источников питания речного стока – End-Member Mixing Analysis (далее по тексту – ЕММА) (Inamdar, 2011).

ЕММА – это метод многомерного статистического анализа, который использует для модели смешения набор трассеров, таких как, например, катионы, анионы, кремнезем, разработанный в конце прошлого века, позволяющий получить информацию о механизме формирования стока (Inamdar, 2011).

Модель достаточно успешно используется для того, чтобы определить и количественно оценить доминирующие источники стока. Об этом можно судить по различным исследованиям, проведенным как зарубежными, так и отечественными учеными.

Данная модель применима для спектра целей и используется при расчете составляющих речного стока (фракций стока) на водотоках различных масштабов. Так, например, модель ЕММА использовалась для малого водосбора исследовательского водораздела Панола Маунтин недалеко от Атланты (штат Джорджия, США). Исследование было посвящено изучению географических источников и гидрологических путей ливневого стока на водосборе площадью 10 Га находящегося в исследовательском водоразделе горы Панола. Оно проводилось с целью устранения ограничений методов отбора проб и проблем недостаточного разрешения потенциальных конечных элементов (Burns et al, 2001).

Исследование влияния размера и состава наборов трассеров на результаты моделирования проводилось на примере реки Силин (Внутренняя Монголия, Китай) (Barthold et al, 2011).

Трассерные исследования формирования речного стока в бассейне озера Байкал, проведенные на примере бассейна ручья Ланинского, были выполнены группой российских исследователей. Авторами проведены адаптация и проверка методики определения вклада источников питания в формирование стока водного объекта, основанной на использовании модели ЕММА (Кичигина и др., 2016).

Также данный метод расчета применим для районов, по которым гидрологическая информация представлена в ограниченном объеме (Сучкова, 2021). Его удобство состоит в том, что нет необходимости для ее применения проводить трудоемкие гидрологические измерения. Применение моделей геохимического смешения и ЕММА в исследованиях

способствовало лучшему пониманию гидрологических и биогеохимических процессов в масштабах водосбора чем то, которое могло быть достигнуто с применением только гидрометрических данных (Inamdar, 2011).

С учетом, успешного опыта применения ЕММА для исследования различных водных объектов и то, что дельта реки Лены расположена в труднодоступном регионе, а также то, что в имеющихся данных достаточно широко представлена гидрохимическая информация по протокам дельты за летний период, для решения поставленных в работе задач была выбрана, именно она.

Глава 2. Материалы и методы исследования

2.1. База данных

В качестве основы для исследования – создания ГИС, а также определения фракций речного стока с использованием аппарата ЕММА, была использована «База данных для гидролого-геохимических характеристик дельты реки Лены» (Lena Delta Hydrogeochemistry) (Четверова и др., 2019). База данных выполнена при непосредственном участии автора работы в рамках производственной практики бакалавра и получила государственную регистрацию как результат интеллектуальной деятельности (РИД). База данных была создана в системе управления базами данных (СУБД) Access, являющейся частью пакета Microsoft Office, так как она достаточно широко распространена и удобна для использования.

База данных создавалась с целью организации данных гидрологических и гидрогеохимических наблюдений в единую систему. Она имеет удобный интерфейс (рисунок 4) и содержит большой объем систематизированных данных. Ее можно использовать при проведении различных исследований, связанных с дельтой Лены, например, для моделирования гидрохимических процессов. Кроме того, вся информация в базе данных приводится на английском языке, что расширяет список потенциальных пользователей базы и дает возможность ее использования международным сообществом.

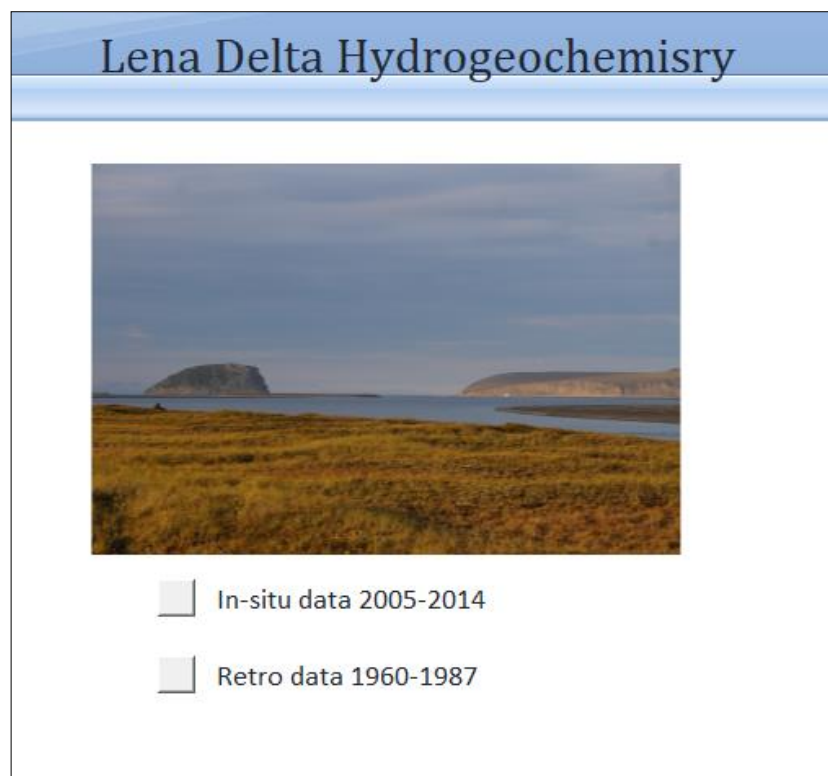


Рисунок 4. Интерфейс базы данных «Lena Delta Hydrogeochemistry».

В базе содержится информация о гидрологических и гидрогеохимических характеристиках дельты реки Лены за периоды с 1960 по 1987 и с 2005 по 2014 годы. Данные за первый период взяты из периодической литературы:

1. Гидрологический ежегодник (бассейн моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей). Том 8, вып. 0-7, 1960-1974 гг.;
2. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод по территории деятельности Омского УГМС. Том. 6, вып. 4-9, 1989-1992 гг.

Данные за второй период представлены результатами экспедиционных наблюдений проводившихся в указанный период в дельте в рамках экспедиции «Лена» Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ). На рисунке 5 представлена блок-схема базы данных.

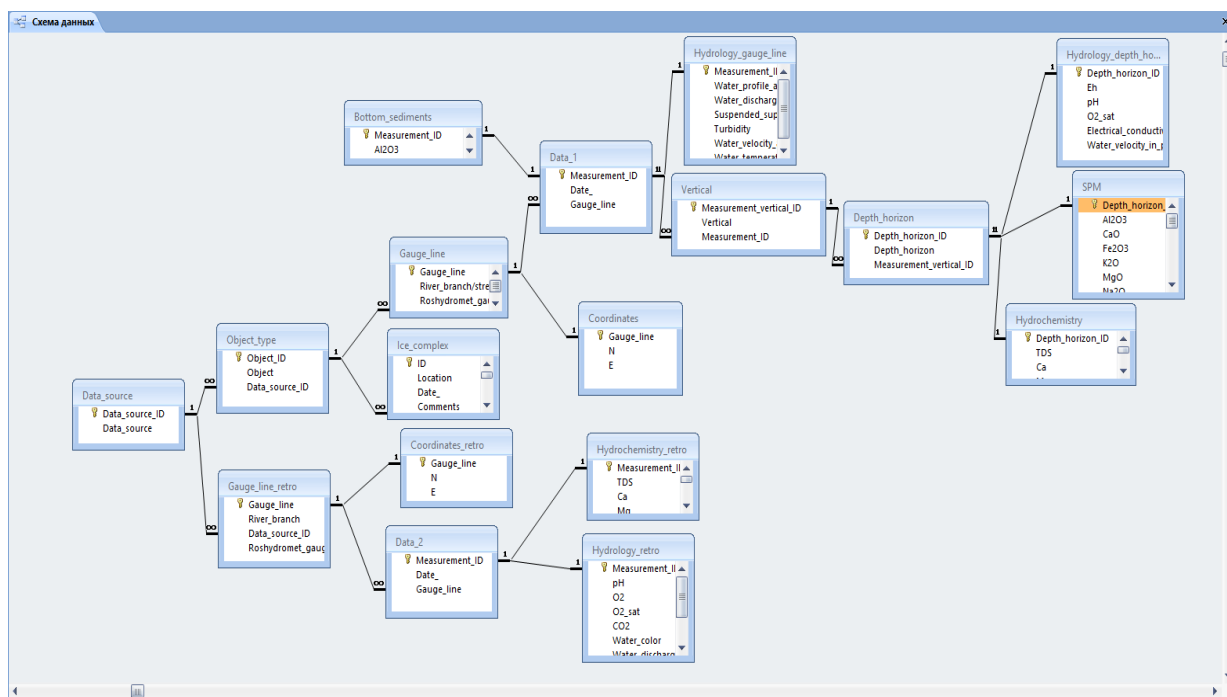


Рисунок 5. Блок-схема базы данных «Lena Delta Hydrogeochemistry».

При написании данной работы, для создания ГИС и проведения модельных расчетов из базы были взяты экспедиционные данные по гидрохимическим характеристикам проток дельты Лены собранные в период с 2005 по 2012 годы. Массив данных включал в себя такие характеристики как значения концентраций главных ионов и микроэлементов, значения измеренных расходов воды, общей минерализации и координаты створов, на которых проводились данные исследования. На рисунке 6 отображено положение речных створов, взятых для исследования.

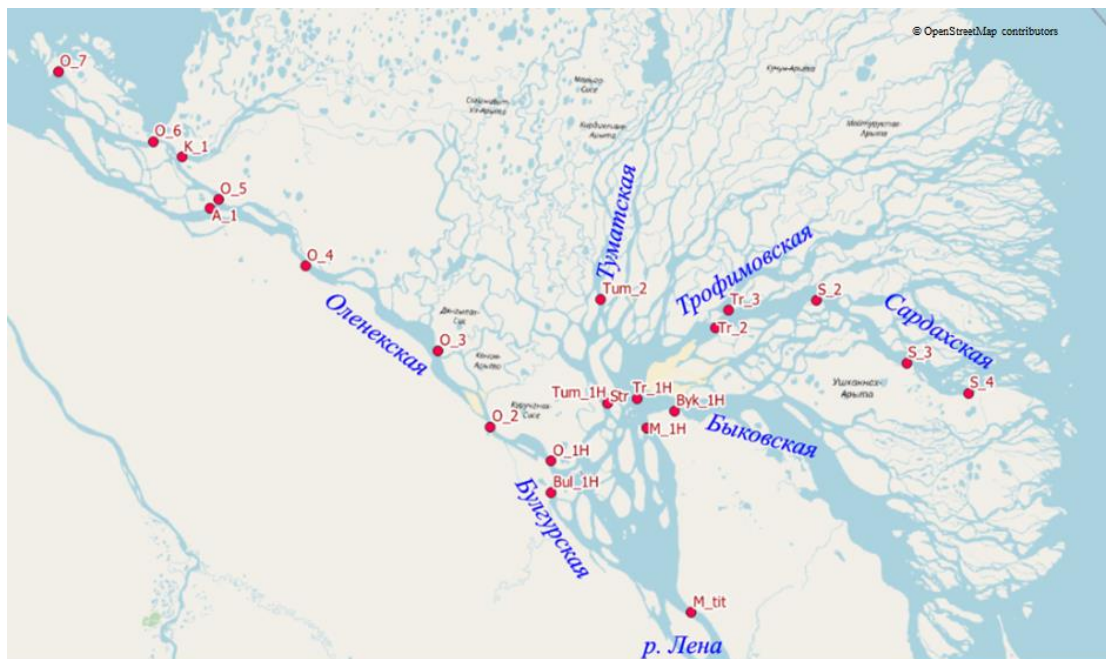


Рисунок 6. Пространственное положение створов гидрогеохимических исследований в дельте реки Лены в 2005-2012 гг.

Для создания ГИС данные были приведены в удобный для использования вид. На основе их была создана расчетная матрица исходных данных, удобная для дальнейшего использования в статистических расчетах.

Для того чтобы провести расчеты с использованием ЕММА, из отобранных данных была сформирована расчетная матрица, удобная для использования в статистической программе. По сравнению с исходными данными, из матрицы были исключены данные, в которых имелись пропуски измерений, т.к. дискретность измерений различных параметров не всегда совпадала вследствие различных причин (утраченные пробы, ошибки при лабораторных анализах, исключение выбросов при статистической обработке выборок).

2.2. Создание ГИС дельты реки Лены

На основе имеющейся базы данных была создана геоинформационная система «Lena_Delta_visualization». Аппаратом для ГИС служила QGIS (свободная географическая информационная система с открытым кодом) (<https://www.qgis.org/ru/site/>).

С помощью QGIS был создан новый проект «Lena_Delta_visualization», куда была подгружена картографическая основа. В качестве картографической основы были выбраны данные некоммерческого веб-картографического проекта OpenStreetMap (OSM). Для того чтобы подгрузить их в проект использовался специальный модуль QGIS – QuickMapServices (<https://www.openstreetmap.org/>).

Также из базы данных были подгружены координаты створов, которых происходил отбор проб. Они были показаны в виде красных точек с подписями створов. Также в этот проект были подгружены данные гидрохимических наблюдений и данные по измеренным расходам воды и общей минерализации.

После этого для визуализации результатов расчетов их необходимо было привести в вид удобный для использования в QGIS. Для этого были созданы специальные таблицы данных и результатов вычислений, которые были импортированы в проект QGIS и использованы для создания векторных слоев.

Для отображения долей вкладов источников питания в общий сток реки был использован круговые диаграммы, показывающие их процентное соотношение. Для построения круговых диаграмм в QGIS необходимо выбрать слой, в котором содержатся данные, которые надо отобразить в виде круговых диаграмм. Открыть свойства этого слоя и выбрать вкладку «Диаграммы». На этой вкладке в раскрывающемся списке выбирается пункт «Круговая диаграмма». Далее открывается подпункт «Атрибуты», и в нем выбираются те столбцы из таблицы атрибутов слоя, в которых содержится интересующая нас информация, а также задается цветовое отображение для этих столбцов. В подпункте «Размер» задается размер круговой диаграммы. А в подпункте «Размещение» задается положение диаграмм относительно точек створа. А для отображения гидрохимических характеристик и расходов воды были выбраны гистограммы (столбчатые диаграммы), которые строятся аналогично круговым диаграммам. Только вместо пункта круговые диаграммы выбирается пункт «Гистограмма». В нем выбираются отображаемые атрибуты, задается ширина столбцов и масштаб диаграмм. Пример отображения данных приведен на рисунке 7.

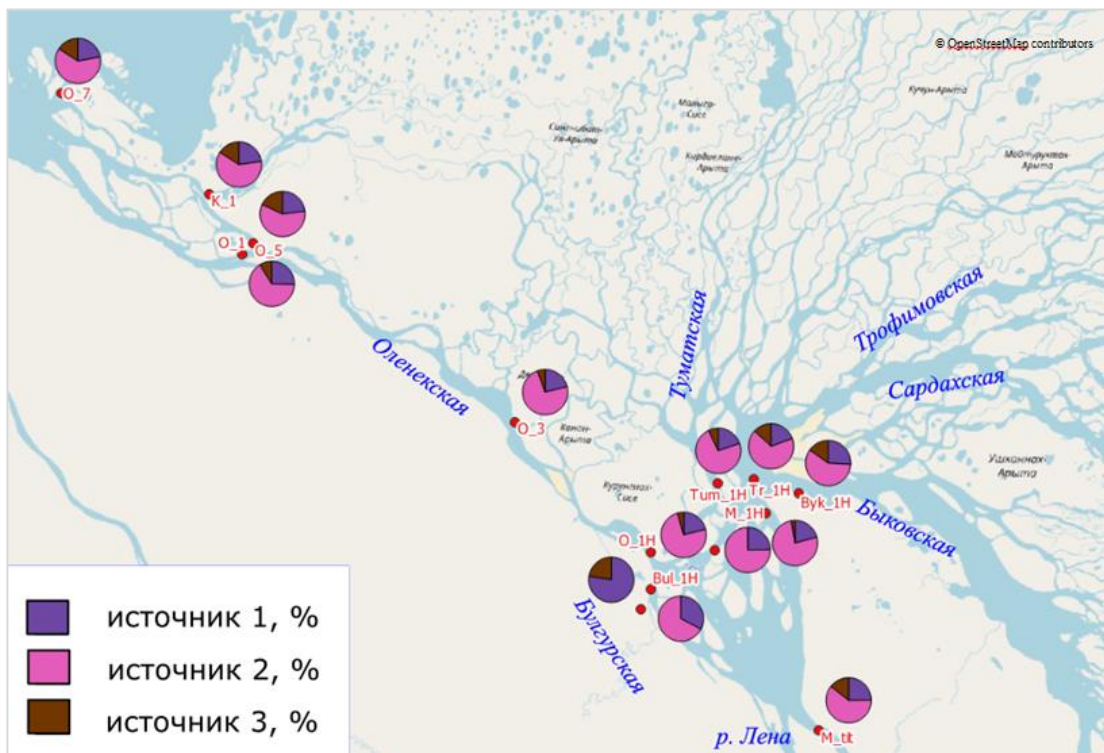


Рисунок 7. Распределение долей вкладов основных составляющих речного стока в дельте реки Лены в летний период в 2012 году.

В результате был создан проект «Lena_Delta_visualization», который содержит данные гидрогеохимических наблюдений, результаты расчетов и отображает их пространственное положение. Благодаря созданной ГИС можно составить визуальное представление о пространственном распределении долей вкладов источников в общий сток за разные годы и значений концентраций трассеров.

2.3. Описание алгоритма модели ЕММА

ЕММА – основывается на определении типов природных вод, которые формируют водные массы, и количественной оценке компонентов смешения, при этом учитываются их функциональные связи и взаимоувязанная динамика, что позволяет получить информацию о формировании речного стока (Губарева и др., 2015).

Оценку источников питания можно выполнять на основе модели смешения для трех источников при использовании двух трассеров. Модель строится, основываясь на принципе сохранения баланса воды и растворенных веществ.

Система уравнений используемых в модели смешения:

$$\begin{cases} f_1 + f_2 + f_3 = 1 \\ C_1^1 f_1 + C_2^1 f_2 + C_3^1 f_3 = C_t^1 \\ C_1^2 f_1 + C_2^2 f_2 + C_3^2 f_3 = C_t^2 \end{cases} \quad (1).$$

Решение приведенной системы уравнений:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{(C_t^1 - C_3^1)(C_2^2 - C_3^2) - (C_2^1 - C_3^1)(C_t^2 - C_3^2)}{(C_1^1 - C_3^1)(C_2^2 - C_3^2) - (C_2^1 - C_3^1)(C_1^2 - C_3^2)} \\ f_2 = \frac{C_t^1 - C_3^1}{C_2^1 - C_3^1} - \frac{C_1^1 - C_3^1}{C_2^1 - C_3^1} f_1 \\ f_3 = 1 - f_1 - f_2 \end{cases} \quad (2),$$

где:

f – доли расходов источников питания,

C – концентрации трассеров,

t – текущий момент времени,

верхний индекс – номер трассера,

а нижний – номер источника.

Также решение системы (1) можно получить с помощью матриц:

$$C_x f_x = C_t \quad (3),$$

где:

$$C_x = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ C_1^1 & C_2^1 & C_3^1 \\ C_1^2 & C_2^2 & C_3^2 \end{vmatrix} - \text{матрица концентраций для } n\text{-го количества трассеров,}$$

$$f_x = \begin{vmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{vmatrix} - \text{матрица долей стока } n+1 \text{ числа источников,}$$

$$C_t = \begin{vmatrix} 1 \\ C_t^1 \\ C_t^2 \end{vmatrix} - \text{матрица концентраций трассеров речных вод на момент времени.}$$

Искомые доли стока вычисляются из следующего уравнения:

$$f_x = C_t C_x^{-1} \quad (4),$$

где C_x^{-1} – обратная матрица C_x .

При применении модели геохимического смешения необходимо учитывать ряд ключевых допущений. Во-первых, выбранные трассеры консервативны, другими словами, их концентрации не меняются из-за биогеохимических процессов в том временном масштабе, который рассматривается моделью смешения. Во-вторых, процесс смешения линеен. В-третьих, имеет место инвариантность в пространстве химического состава конечных элементов (концентраций трассеров), другими словами, их концентрации постоянны в пространстве. В противном случае они рассматриваются как разные компоненты. Также имеет место инвариантность во времени химического состава конечных элементов (концентраций трассеров) – их концентрации постоянны во времени или их колебания известны (Inamdar, 2011; <https://slideplayer.com/slide/10477042/>). Также необходимо чтобы

между концентрацией трассеров в речных водах и источниках существовало бы достаточное различие (Кичигина и др., 2016).

Допущения о линейности процесса смешения и консервативности трассеров могут быть оценены с помощью двумерных диаграмм смешения (геометрический метод) или остатков между исходными и проецируемыми данными (алгебраический метод) (Inamdar, 2011). Пример такого графика приведен на рисунке 8. По осям откладываются значения используемых трассеров. Внутри треугольника значения потока. В вершинах треугольника значения источников.

Для проведения расчетов с помощью ЕММА первоначально необходимо определиться с выбором потенциальных источников (фракций) формирования стока для конкретного объекта исследования. Для этого рассматриваются различные типы вод, например, почвенные, дождевые и другие и на основе имеющихся знаний об объекте и природных условий его водосборной территории определяются основные составляющие речного стока. В модели используется предположения, что химический состав воды зависит от процесса смешения нескольких источников, например, трех источников.

Адекватность источников проверяется с помощью диаграмм смешения. Для этого рассчитываются медианные значения концентраций трассеров из совокупности данных для каждого типа источника. Эти значения представляют собой в двумерном пространстве вершины треугольника. И, если смешение – консервативно, трассеры правильно отобраны и источники выбраны адекватно, то значения потока должны оказаться внутри этого треугольника. Иное расположение значений указывает на то, что либо трассеры не консервативны, либо источники недостаточно хорошо охарактеризованы (<https://slideplayer.com/slide/10477042/>).

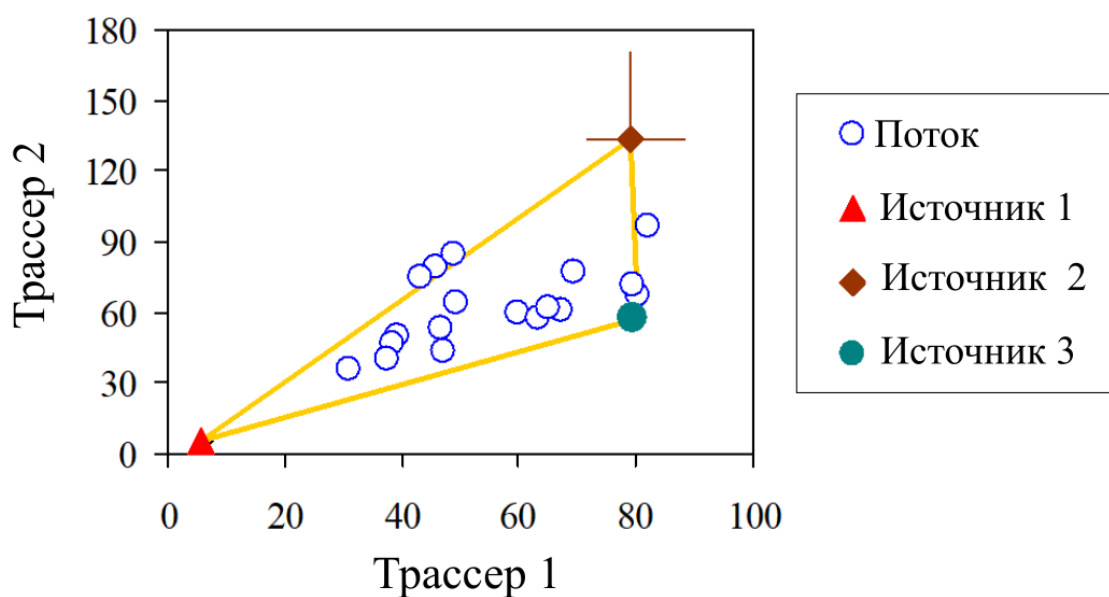


Рисунок 8. Пример диаграммы смешения (<https://slideplayer.com/slide/4954067/>).

Далее были определены два сложных модельных трассера, которые являются линейными комбинациями исходных трассеров. Для этого использовался метод главных компонент, с помощью которого исходные данные проецировались в подпространство взаимно ортогональных главных компонент (U-пространство). В качестве главных компонент выступают сложные модельные трассеры. Затем была решена модель смешения, где использовались уже главные компоненты, и не исходные простые трассеры (Кичигина и др., 2016).

Таким образом, можно перечислить основные процессы составляющие модель ЕММА:

1) Формирование выборки данных и определение консервативных трассеров, с помощью построения двумерных графиков.

2) Применение метода главных компонент для нахождения сложных трассеров. Теоретические основы метода рассмотрены далее в работе.

3) Проецируем в U-пространство.

Для этого данные должны быть стандартизированы путем вычитания среднего значения потока и последующим делением на стандартное отклонение потока. При проверке после стандартизации среднее значение должно быть равно нулю, а отклонение должно быть равно единице. Далее проецируем в U-пространство по формуле:

$$U = XV^T \quad (5),$$

где:

X – матрица стандартизированных исходных значений;

V^T – матрица нагрузок, полученная в результате факторного анализа;

U – проекция в U-пространство.

Также необходимо спроецировать значения источников в U-пространство. Поэтому необходимо провести стандартизацию источников матрицы источников. Для этого используются значения средних значений и стандартных отклонений трассеров. Полученная матрица проецируется в U-пространство (Губарева и др., 2015).

4) С помощью ортогональных проекций и обобщенных уравнений модели смешения находим составляющие (фракции) стока или доли вклада источников в формирование стока.

Для этого используются проекции, полученные в методе главных компонент. Таким образом, ситуация не будет чрезмерно детерминирована с точки зрения математики.

Для получения количественных значений расходов воды система линейных уравнений (6) должна быть решена относительно Q (<https://slideplayer.com/slide/4954067/>).

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_t \\ U_1^1 Q_1 + U_1^2 Q_2 + U_1^3 Q_3 = U_1 Q_t \\ U_2^1 Q_1 + U_2^2 Q_2 + U_2^3 Q_3 = U_2 Q_t \end{cases} \quad (6),$$

где:

Q_i, Q_t – расходы воды;

U_j^i – проекция значений в U-пространство;

i – индекс, указывающий на источник, конечный элемент;

j – индекс, указывающий на сложный трассер;

t – обозначает поток.

А доли вкладов источников в формирование общего стока можно получить, решив систему линейных уравнений 7.

$$\begin{cases} a_1 + a_2 + a_3 = 1 \\ U_1^1 a_1 + U_1^2 a_2 + U_1^3 a_3 = U_1 \\ U_2^1 a_1 + U_2^2 a_2 + U_2^3 a_3 = U_2 \end{cases} \quad (7),$$

где:

U_j^i – проекция значений в U-пространство;

a_i – доля вклада источника;

i – индекс, указывающий на источник, конечный элемент;

j – индекс, указывающий на сложный трассер.

В результате решения системы линейных уравнений методом обратной матрицы, можно получить значения отражающие вклад источников в общий расход воды (Barthold et al, 2011).

Таким образом, применение данной модели решает поставленную перед автором работы задачу.

2.4. Статистический анализ гидрохимических данных

Одной из составляющих расчетов, проводимых с помощью модели ЕММА, является снижение размерности исходной матрицы данных с помощью факторного анализа, который проводился в работе методом главных компонент.

Факторный анализ – это методика, которая заключается в проведении комплексного и системного изучения, измерения степени воздействия фактора на величину результативного показателя (Савицкая, 2002). Математическая модель факторного анализа представляет собой набор линейных уравнений, для которого свойственно то, что каждая наблюдаемая переменная x_i выражена в виде линейной комбинации общих факторов F_1, \dots, F_n и уникального фактора U_i :

$$x_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}F_k + U_i \quad (8),$$

где: $i=\overline{1,m}$ и $k=\overline{1,n}$, при этом n и m – это количество факторов и переменных соответственно, причем $n \ll m$; a_{ik} – факторная нагрузка (Фомина, 2017).

Факторный анализ может применяться для того, чтобы достигнуть две основные цели, а именно для редукции данных и для классификации переменных. Под редукцией данных подразумевается сокращение числа переменных. А под классификацией переменных понимается определение структуры взаимосвязей между переменными (<http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>). Сокращение количества переменных дает возможность проводить анализ по тем факторам, которые были выявлены в ходе применения факторного анализа, и их число может быть заметно меньше числа исходных переменных. Суть анализа состоит в том, что измеряемые эмпирические показатели считаем следствием других характеристик (латентных переменных), которые являются скрытыми от непосредственного их измерения (https://nafi.ru/upload/spss/Lecture_8.pdf).

Основными показателями, с помощью которых можно определить степень целесообразности применения факторного анализа являются: мера адекватности выборки Кайзера-Мейера-Олкина (КМО) и критерий сферичности Бартлетта.

КМО: Факторный анализ можно применять, если значения КМО находятся в районе от 0,5 до 1. Если же значения меньше 0,5 тогда к данной выборке применение факторного анализ будет не показательно.

Критерий сферичности Бартлетта: С его помощью можно проверить, отличие значений корреляции от 0. Если ее значение близко к нулю, то это значит, что переменная является независимой с другими. Проводить факторный анализ допускается в том ситуации, когда значение значимости меньше 0,05 (Изакова, Журавлева, 2013).

Процедуру факторного анализа можно разбить на несколько этапов. Для начала необходимо сформулировать проблему. Затем вычислить корреляционную матрицу для всех переменных, которые будут участвовать в анализе. После этого проводится выбор метода для проведения факторного анализа. Затем извлекаются факторы. Далее необходимо провести их вращение. И, наконец, определяются значения факторов (Изакова, Журавлева, 2013).

Существуют разные способы проведения факторного анализа. В данной работе рассматривается метод главных компонент, который иногда выделяют в отдельный метод.

Метод главных компонент основывается на определении минимального числа факторов, которые обладают наибольшим вкладом в общую дисперсию данных (https://nafi.ru/upload/spss/Lecture_8.pdf).

Основная цель метода это выявление наиболее общих свойств изучаемого процесса, вызывающих коррелированное изменение измеряемых признаков.

Выделение главных компонент осуществляется по следующему алгоритму:

- Проводится стандартизация исходных переменных. В результате дисперсии всех стандартизированных переменных будут одинаковыми (переменные будут иметь одинаковую информативность), начало координат перенесется в центр облака данных.
- Осуществляется линейное преобразование пространства для того, чтобы построить новое пространство главных компонент, которое будет являться ортогональным. Для его осуществления необходимо рассчитать факторные нагрузки, являющиеся коэффициентами корреляции между главными компонентами и исходными переменными. Если абсолютные значения факторных нагрузок для переменных больше 0,7, то эти переменные будут описывать факторы.
- Выполняется сокращение размерности пространства с помощью исключения переменных, которые являются неинформативными.

При этом должны выполняться следующие требования:

- главные компоненты – линейные комбинации переменных;
- главные компоненты ортогональны;
- первая главная компонента обладает максимальной выборочной дисперсией, вторая главная компонента обладает максимальной выборочной дисперсией при фиксированной первой и так далее;
- суммарная дисперсия главных компонент и суммарная дисперсия исходных переменных являются равными (Фомина, 2017).

Для определений числа факторов может применяться критерий «Каменистой осыпи». Он представляет собой график собственных значений факторов, которые расположены в порядке убывания. Необходимо найти ту точку, в которой происходит сильное замедление собственных значений. Те факторы, которые находятся после этой точки, несущественны.

Также для получения числа факторов используют критерий Кайзера. Его суть заключается в том, что для анализа данных могут отбираться только факторы, с собственным значением большим или равным 1, так как они обладают большей информативной ценностью (<http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>).

В результате факторного анализа выделяются факторные нагрузки, отображающие корреляции между переменными и выделенными факторами. Значения факторных нагрузок можно визуализировать на диаграмме рассеивания, на которой переменные показываются точками. Оси могут поворачиваться в любом направлении, без изменения относительного

положения точек, но с изменением значений действительных координат – факторных нагрузок. Для получения понятной матрицы факторных нагрузок, отображающей высокие или низкие значения корреляций между переменными и выделенными факторами, проводится вращение.

Вращение факторов часто проводится с использованием такого типа вращения, как «Варимакс». Данный тип вращения – ортогонален. При его применении у осей сохраняется взаимное расположение под углом в 90° . С помощью «Варимакса» максимизируется величина дисперсии и минимизируется величина разброса вокруг дисперсии. Кроме описанного типа вращения существуют другие виды вращения. Например, вращения кватримакс и эквимакс (<http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>).

Таким образом, в результате факторного анализа определяются главные компоненты, их количество и взаимосвязь с исходными факторами, выраженная в виде матрицы нагрузок. Эти результаты являются важными составляющими частями в ЕММА.

2.5. Выявление гидрохимических трассеров формирования речного стока

Для выявления гидрохимических трассеров формирования речного стока, вначале необходимо было сформировать выборку по гидрохимическим данным. В нее вошли данные по значениям концентраций главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) и микроэлементов (Si^{4+} , Al^{3+} , Ba^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Sr^{2+}).

В качестве генетических источников в работе рассматривались три источника формирования речного стока в летний период:

- Источник 1 – талые мерзлотные воды;
- Источник 2 – атмосферные осадки;
- Источник 3 – грунтовые воды.

Необходимые для получения характеристик каждого из обозначенных потенциальных составляющих стока реки данные были отобраны в результате экспедиционных работ в дельте реки Лены.

Таким образом, для характеристики талых мерзлотных вод (источник 1) были отобраны образцы талых вод из временных водотоков, стекающих из ледового комплекса. Для второго источника были отобраны образцы атмосферных осадков. Также были отобраны образцы поровых вод из активного талого слоя почвы, характеризующие грунтовое питание (источник 3).

Следующим этапом является определение консервативных трассеров. Для этого была построена серия графиков, выполненная в соответствии с приведенным в пункте 2.3.

описанием. Для построения графиков использовались данные для источников и данные из сформированной выборки. Их анализ проведен в соответствии с описанием, приведенным выше. После построения первой серии графиков был сделан вывод, что часть данных нуждается в уточнении. Для этого был проведен анализ опубликованных баз данных, и исследований по данному региону. И в результате часть данных была уточнена по литературным источникам (Семенец др., 2017). И построена итоговая серия графиков.

Примеры построенных графиков приведены на рисунках 9 и 10.

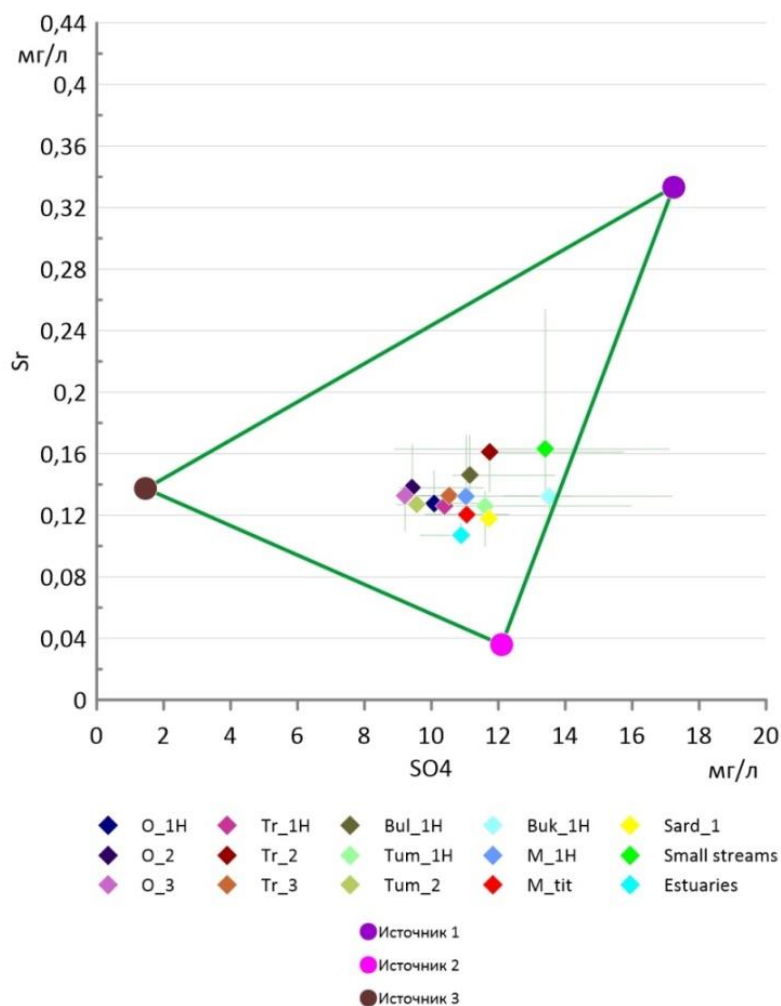


Рисунок 9. Диаграмма смешения для концентраций Sr^{2+} и SO_4^{2-} как пример консервативных трассеров.

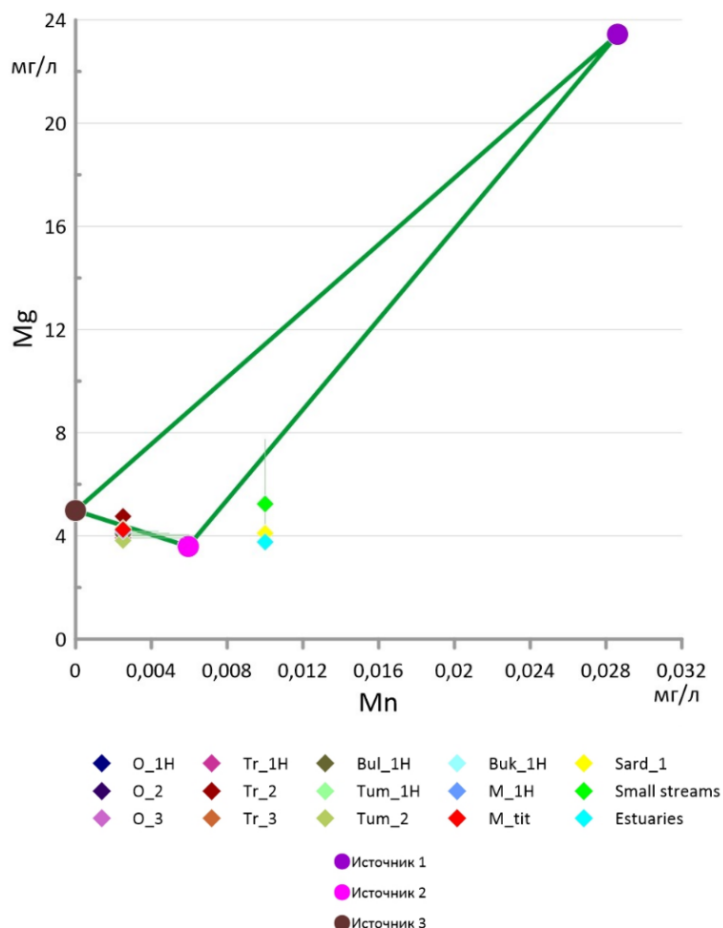


Рисунок 10. Диаграмма смешения для концентраций Mg^{2+} и Mn^{2+} как пример неконсервативных трассеров.

На примере приведенных выше диаграмм видно, что данные отображенные на рисунке 9 пригодны для дальнейшего использования, а данные отображенные на рисунке 10 не являются удовлетворительными для использования их в модели.

В результате анализа полученной серии графиков из выборки были отсеяны те трассеры, которые не соответствовали допущением, принятым в модели. А именно Fe^{3+} , K^- , Mg^{2+} , Mn^{2+} .

Следующим этапом стало применение метода главных компонент для анализа выборки данных.

Для проведения факторного анализа, методом главных компонент, было выбрано свободное программное обеспечение для статистического анализа данных – PSPP.

Для начала была взята выборка, состоящая из значений: Al^{3+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , Si^{4+} , Sr^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} .

Для проведения анализа были заданы следующие параметры извлечения:

- Метод – анализ главных компонент;
- Анализ проводился с помощью матрицы корреляций.

А для проведения вращения выбран метод «Варимакс». Для оценки выборки с точки зрения возможности проведения факторного анализа были использованы КМО и критерий сферичности Бартлетта.

В результате анализа и оценки, получившихся в результате применения метода главных компонент значений, был сделан вывод, что для получения более репрезентативных значений необходимо было исключить еще несколько трассеров из выборки. После проведения анализа трассеров, учета уже полученных значений факторного анализа из выборки были исключены Na^+ , Al^{3+} и Si^{4+} . В итоговую выборку вошли пять трассеров Ba^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} . По этой выборке был снова проведен факторный анализ, по описанному выше алгоритму.

Для проверки применимости данной выборки были получены значения показателей КМО и критерия сферичности Бартлетта. Полученное КМО равно 0,55. Оно больше 0,5, это значит, что первый этап проверки на возможность применения факторного анализа пройден. А так как значение значимости нулевое, то и второй этап проверки пройден успешно.

Также была получена таблица распределения совокупной дисперсии и собственных значений. Из нее по критерию Кайзера понятно, что для анализа могут быть выделено два фактора. Процент дисперсии для них равен 81,6%.

Количество главных компонент также можно определить исходя из полученного графика собственных значений, по методу каменистой осыпи. Для дальнейшего анализа выбираются компоненты, лежащие выше излома кривой.

Результатом факторного анализа является таблица матриц компонентов, содержащая значения корреляций с гидрохимическими характеристиками.

2.5 Определение долей вклада генетических источников в речной сток

Следующий этап работы заключался в определении долей вклада генетических источников в речной сток. Для этого необходимо было выполнить ряд вычислений и графических построений.

Сначала выполнялось проецирование данных в U-пространство, образованное главными компонентами, полученными в результате проведения факторного анализа.

Для этого были найдены средние значения и стандартные отклонения исходных данных и с их помощью, как было описано в пункте 2.3 данной главы работы при разборе алгоритма модели ЕММА, была получена матрица стандартизированных значений (X). Далее выполнялось проецирование значений в U-пространство по формуле 5 из указанного

выше пункта работы. Потом была проведена стандартизация источников матрицы источников и ее проекция в U-пространство.

После получения значений проекций в U-пространство для «сложных» трассеров и источников они были визуализированы на двумерном графике U-пространства, который представлен на рисунке 11. Из графика видно, что часть точек находится внутри области, обозначенной источниками, а часть данных вылетает из нее.

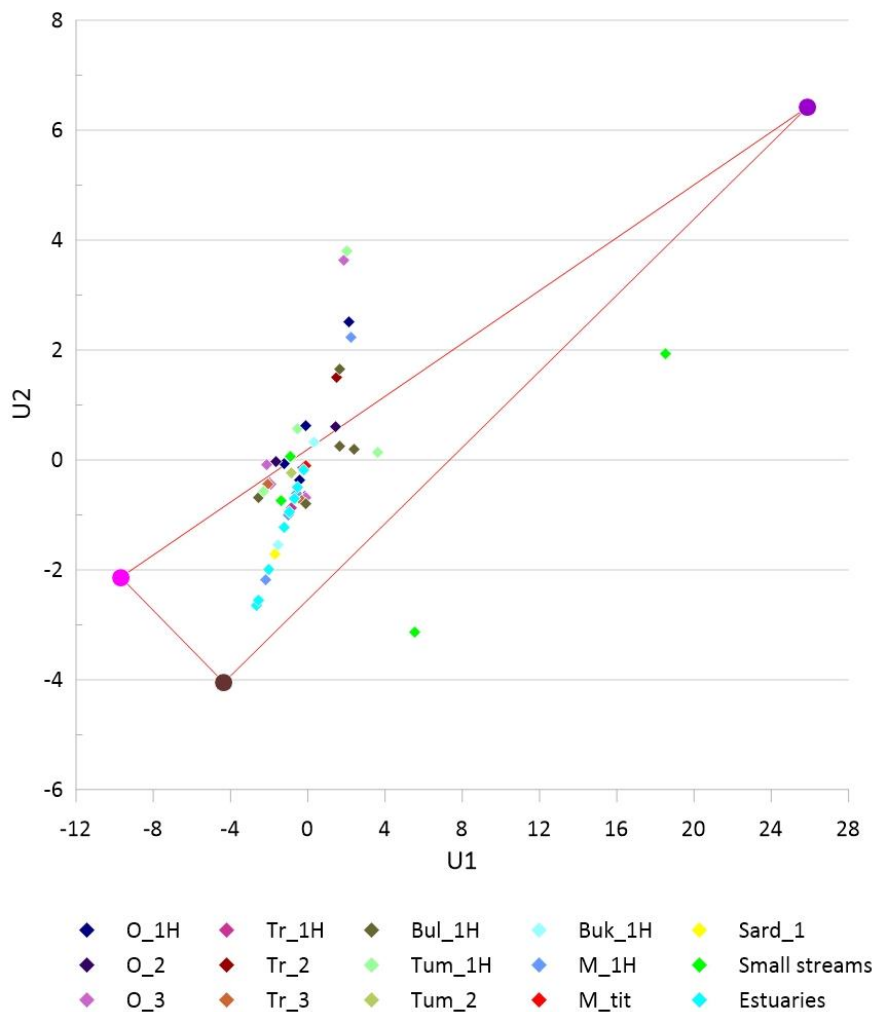


Рисунок 11. Проекция значений гидрохимических характеристик дельты реки Лены за 2005-2012 гг. в U-пространство.

Сначала разберем ситуацию, когда точки лежали внутри треугольника. В этом случае для нахождения распределения вклада источников необходимо найти решение системы уравнений (7), приведенной в пункте 2.3. данной работы.

В результате решения системы линейных уравнений методом обратной матрицы, получены значения отражающие вклад источников в общий расход воды.

Для ситуации, когда значение «вылетело» за пределы треугольника, использовался метод решения выбросов, приведенный в (Liu et al, 2004). Это геометрический способ решения. Его можно разобрать с помощью рисунка 12.

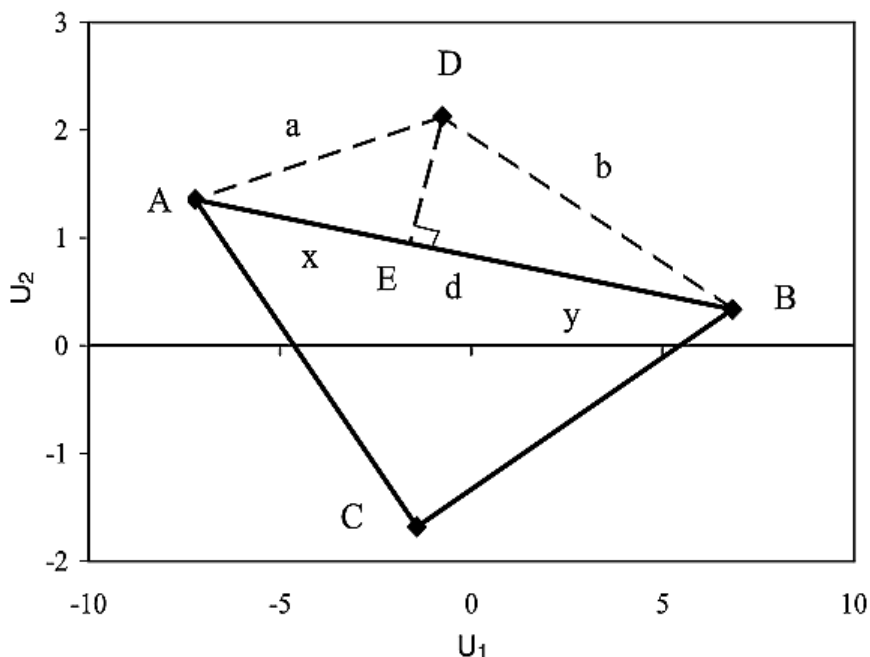


Рисунок 12. Диаграмма, иллюстрирующая, как устраняется выброс с использованием геометрического подхода (Liu et al, 2004).

Если смотреть на рисунок 12, то на нем A,B,C являются проекциями источников в U-пространство, D – «выбросом», E – проекцией D на линию AB. Координаты точек A,B,D в U-пространстве обозначены как (A_{U1}, A_{U2}) , (B_{U1}, B_{U2}) , (D_{U1}, D_{U2}) соответственно. Расстояния, обозначенные как a,b,d, можно определить с помощью теоремы Пифагора, как показано в приведенных под номером (9) формулах.

$$\begin{aligned}
 a &= \sqrt{(A_{U1} - D_{U1})^2 + (A_{U2} - D_{U2})^2} \\
 b &= \sqrt{(B_{U1} - D_{U1})^2 + (B_{U2} - D_{U2})^2} \quad (9), \\
 d &= \sqrt{(B_{U1} - A_{U1})^2 + (B_{U2} - A_{U2})^2}
 \end{aligned}$$

Найдя a, b, d, можно найти x и y, выразив их, как показано в формулах (10) и (11).

$$x = \frac{a^2 + d^2 - b^2}{2d^2} \quad (10)$$

$$y = 1 - x \quad (11)$$

При использовании данного метода для «выброса», находящегося между точками A, B, предполагается, что вклад C является нулевым. А доли A и B, обозначенные как f_A и f_B соответственно, обратно пропорциональны их расстоянию до E (формула 12) (Liu et al, 2004).

$$\frac{f_A}{f_B} = \frac{y}{x} \quad (12)$$

Так как вклад С равен нулю, то

$$f_A + f_B = 1 \quad (13).$$

Следовательно, получаются равенства (14) и (15) (Liu et al, 2004).

$$f_A = y \quad (14)$$

$$f_B = x \quad (15)$$

Этот метод может использоваться, если проекция «вылета» лежит между значениями двух источников (в разобранный примере Е должно лежать между А и В) (Liu et al, 2004). Так как проекции «вылетов», полученных в ходе применения модели, как видно из рисунка 13, соответствуют данному условию, значит использование этого метода в данной работе допустимо. Поэтому принимаем источник 1 как В, источник 2 как А, источник 3 как С. И рассчитываем значения по данному методу. Полученные в итоге значения – это доли вклада источников.

В результате получены значения долей источников, для тех ситуаций, когда наблюдались «вылеты».

Таким образом, в ходе решения систем линейных уравнений и применения геометрического метода, были найдены доли вкладов источников в расходы воды в ряде створов в дельте реки Лена. Также по результатам, полученным в ходе проведения расчетов по модели ЕММА, были построены графики, показывающие разброс значений долей вклада источников в среднем по створам.

Глава 3. Результаты исследования

3.1. Результаты проведенного исследования

Дельта реки Лены – крупная арктическая речная дельта, находящаяся в районе распространения многолетнемерзлых пород, которая в силу особенностей своего формирования и развития, сложной разветвленной структуры и других характеристик предоставляет обширный материал для проведения исследований. Одно из направлений таких исследований, а именно работа с гидрохимическими характеристиками стока и выявление источников формирования стока и значения их вклада в него было рассмотрено в данной работе.

Таким образом, в результате проведенного исследования были получены следующие результаты:

1. Создана ГИС дельты реки Лены.
2. Проведен статистический анализ гидрохимических характеристик дельты на основе метода главных компонент.
3. На основе анализа собранной теоретической информации и данных натурных измерений в дельте реки Лены были установлены:
 - основные фракции речного стока в дельте;
 - рассчитан вклад основных источников (фракций) в речной сток в дельте.
4. Проведен анализ результатов исследования.

3.2. ГИС дельты реки Лены

Одним из результатов работы стала созданная по дельте Лены ГИС-«Lena_Delta_visualization». Она позволяет получить наглядное представление о данных, используемых в работе и полученных в результате ее выполнения. Например, ГИС дает возможность увидеть расположение в пространстве створов гидрологических измерений и точек пробоотбора, понять степень охвата данными объекта исследования. Кроме того, ГИС позволяет получить визуальное представление о данных содержащихся в базе данных, увидеть наличие или отсутствие закономерностей их распределения исследуемых характеристик в пространстве. ГИС позволяет собрать вместе материалы, используемые в работе и результаты для быстрого и наглядного их представления и дальнейшего использования.

В ней содержатся данные по значениям концентраций главных ионов, микроэлементов, а также данные по значениям расходов воды и долей вкладов генетических источников формирования стока. В ГИС представлено как распределение данных по годам, так и медианные значения за весь рассматриваемый период для створов дельты реки Лены.

В ней выполнена визуализация необходимых для работы данных и результатов моделирования. С ее помощью было получено представление о пространственном распределении данных по дельте Лены. На рисунке 13 представлены примеры отображения данных в ГИС «Lena_Delta_visualization».

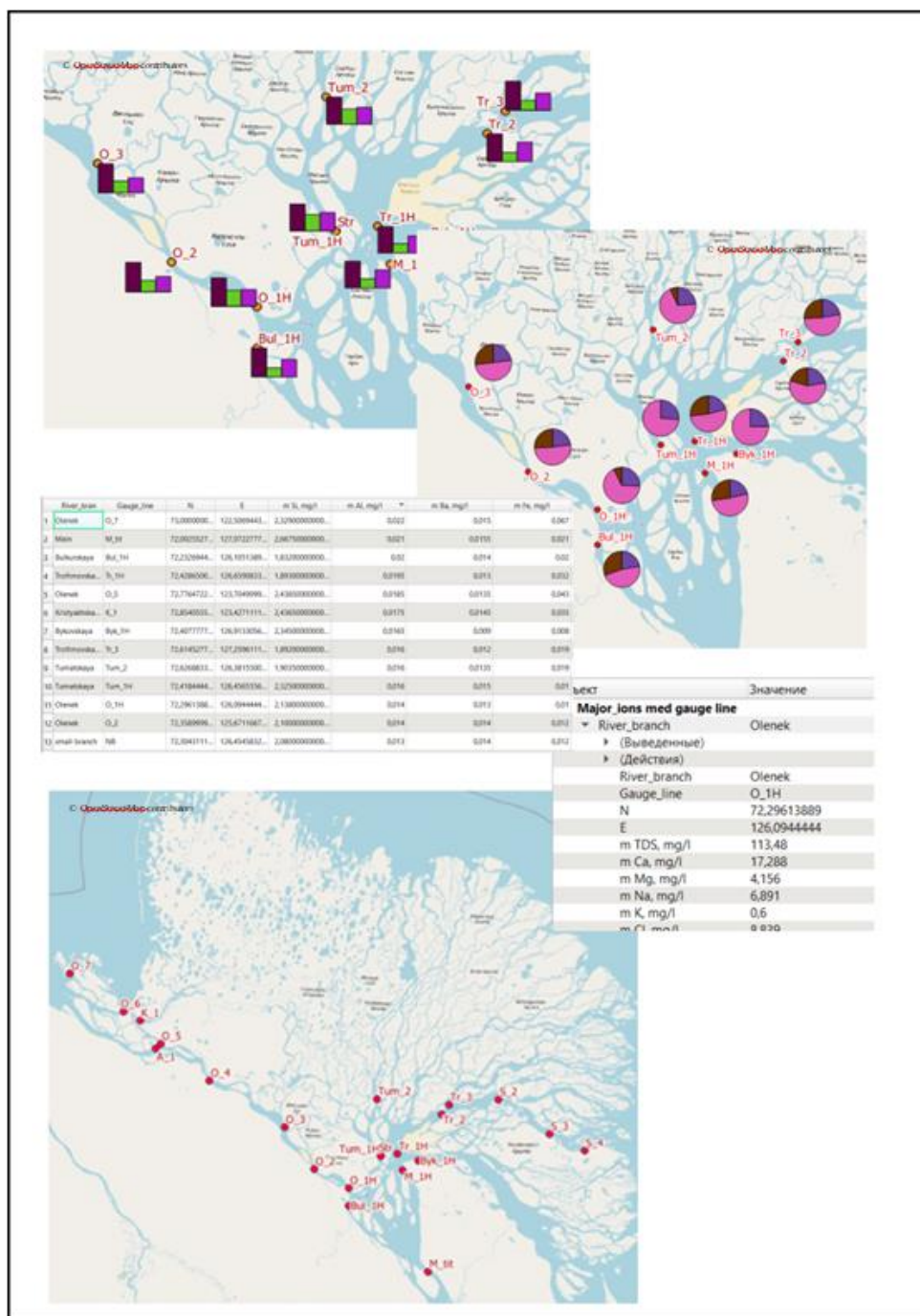


Рисунок 13. Примеры отображения окон в ГИС «Lena_Delta_visualization».

Для отображения пространственного распределения данных в дельте реки Лены по гидрологическим створам хорошо подходит такой способ картографического отображения, как способ локализованных диаграмм. Значения гидрохимических показателей, расходов воды по створам визуализированы с помощью гистограмм. Такое представление является наиболее удобным для отображения таких данных. Оно позволяет получить представление о пространственном распределении данных, а также проводить сравнительный анализ данных для одного створа. Но необходимо учитывать, что данный способ отображения не очень удобен для данных имеющих разную размерность, например, для одновременной визуализации значений для макроэлементов и микроэлементов или для визуализации показателя имеющего большие амплитуды значений. В таком случае либо одни столбцы будут слишком большими, либо другие столбцы будут слишком маленькими для восприятия и анализа. Данный недостаток компенсируется возможностью оперативно узнать значения характеристик из атрибутивных таблиц, например, с помощью инструмента «определить объекты» оперативно получить информацию для конкретного объекта, или изменить масштаб отображения. Но его наличие может снижать наглядность восприятия информации. Поэтому для одновременного отображения с помощью гистограмм лучше подходят данные имеющие одинаковую размерность. Значения вкладов генетических составляющих были визуализированы в виде круговых диаграмм.

ГИС содержит совокупность информации по объекту исследования, обеспечивая удобство их анализа, представления и использования. Представление данных в виде ГИС удобно тем что, данные и их визуализация находятся в одном месте. Пользователь данной ГИС может использовать и работать как с данными из таблицы атрибутов, так и с их визуализацией. В ГИС также есть возможность для проведения расчетов и определения различных статистических параметров, которые могут понадобиться при проведении исследований, что может в значительной степени упростить и ускорить процедуру анализа данных. Например, на рисунке 14 представлены некоторые статистические параметры, которые можно посчитать в ГИС.

1.2 м К, mg/l	
Параметр	Значение
Медиана	0.5915
Ст. откл. (поп.)	0.11298
Ст. откл. (выборка)	0.115309
Минимум	0.34
Максимум	1.042
Диапазон	0.702
Меньшинство	0.34
Большинство	0.554
Множество	24
Q1	0.558
Q3	0.618

Рисунок 14. Представления окна расчета статистических параметров в ГИС.

Таким образом, можно сказать, что ГИС «Lena_Delta_visualization» является как удобным инструментом проведения данного исследования, так и одним из его результатов.

3.3. Результаты статистического анализа гидрохимических данных

В результате проведения факторного анализа методом главных компонент исходная выборка данных была сокращена до выборки, содержащей в себе значения пяти трассеров Ba^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , а также были получены два фактора описывающие 81,6% дисперсии.

Количество факторов было выбрано исходя из критерия Кайзера и принципа «Каменистой осыпи». Так, по графику собственных значений (рисунок 15) видно, что значения начинают медленнее изменяться после третьего значения, поэтому для дальнейшего анализа целесообразно использовать либо 2, либо 3 значения.

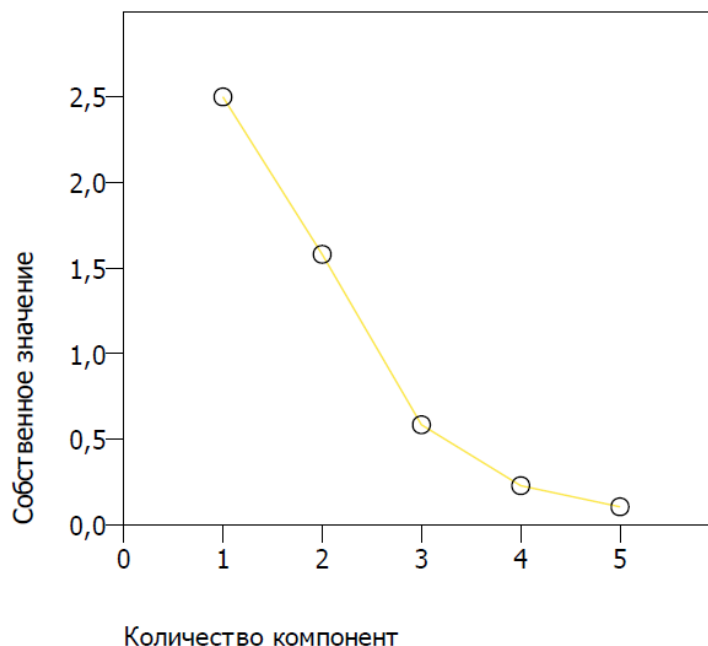


Рисунок 15. График собственных значений для итоговой выборки гидрохимических характеристик дельты реки Лены за 2005-2012 гг.

Результатом факторного анализа стала повернутой матрицы компонент (результат применения вращения «Варимакс»). Она представлена в таблице 1.

Таблица 1. Матрица компонент по результатам анализа для итоговой выборки гидрохимических характеристик дельты реки Лены за 2005-2012 гг.

	Компоненты	
	1	2
Ba	0,79	0,03
Ca	0,94	0,06
Sr	0,94	0,06
Cl	-0,07	0,92
SO4	0,18	0,89

Желтым цветом в таблице выделены гидрохимические характеристики, с которыми наблюдалась наиболее сильная корреляционная связь с выделенными компонентами.

По результатам анализа таблицы повернутой матрицы компонент и таблицы распределения совокупной дисперсии и собственных значений можно сделать следующие выводы:

1. Первая компонента описывает 50% от общей дисперсии и имеет сильные положительные корреляционные связи с Ca^{2+} , Sr^{2+} и связи средней силы с Ba^{2+} .

2. Вторая компонента описывает 31,6% от общей дисперсии и имеет сильные положительные корреляционные связи с Cl^- , SO_4^{2-} .

В результате анализа методом главных компонент, было выделено две главные компоненты которые являются так называемыми «сложными» трассерами. Также была получена матрица факторных нагрузок. Эти результаты необходимы для дальнейшего анализа по модели ЕММА.

Полученные корреляционные связи первой компоненты, возможно, могут быть интерпретированы как особенности водосборной территории, покрытой тундровыми ландшафтами и характеризующейся криогенными процессами, в результате которых, по некоторым данным данные химические элементы могут поступать в активно-талый слой. А полученные корреляционные связи второй компоненты, возможно, характеризуют влияние на формирование химического состава воды более глубинных мерзлотных процессов и могут быть связаны с поступлением их в речные воды в результате деградации ледового комплекса, который, по одной из теорий может иметь морское происхождение (Четверова А. А. и др., 2017). Тем не менее, для более достоверной интерпретации необходимо провести более детальный анализ.

3.4. Генетические составляющие речного стока и их вклад

В ходе анализа литературных источников по объекту исследования и результатов моделирования были выделены три фракции (составляющие) речного стока в дельте реки Лены, а именно воды атмосферного происхождения, талые мерзлотные воды и грунтовые воды, поступающие в реку с поверхностным стоком. Кроме того, был определен вклад каждой их составляющих в формирование речного стока в дельте Лены. Для отдельных створов гидрологических измерений (и пробоотбора) были посчитаны значения вклада источников за период наблюдений. Для более наглядного представления полученные результаты были представлены в виде графиков (рисунки 16-18), где показаны медианные значения полученных долей (ромб) и размах (усы). Также данные были подгружены в ГИС, созданную в рамках работы.

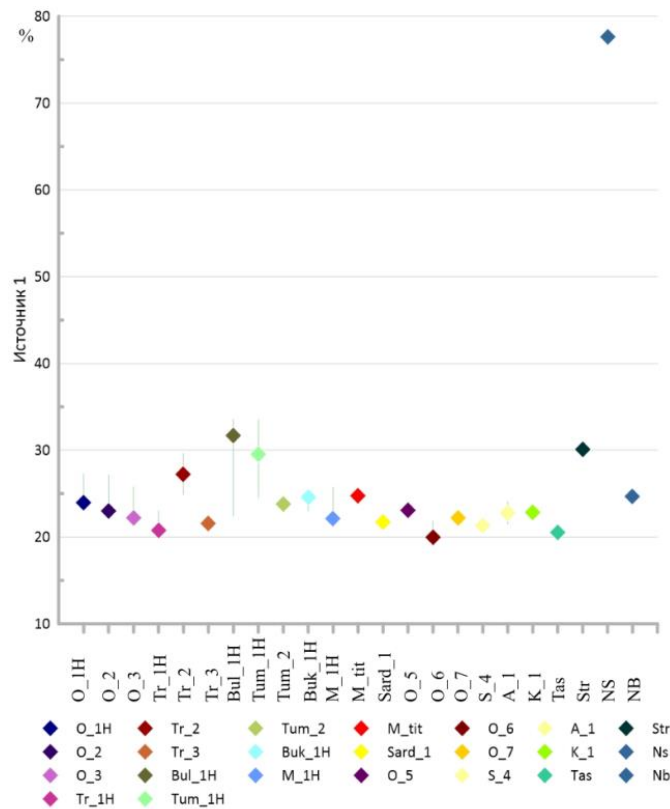


Рисунок 16. Значения долей вклада (%) талых мерзлотных вод (источник 1) для створов гидрологических измерений в дельте реки Лены за период с 2005 по 2012 гг.

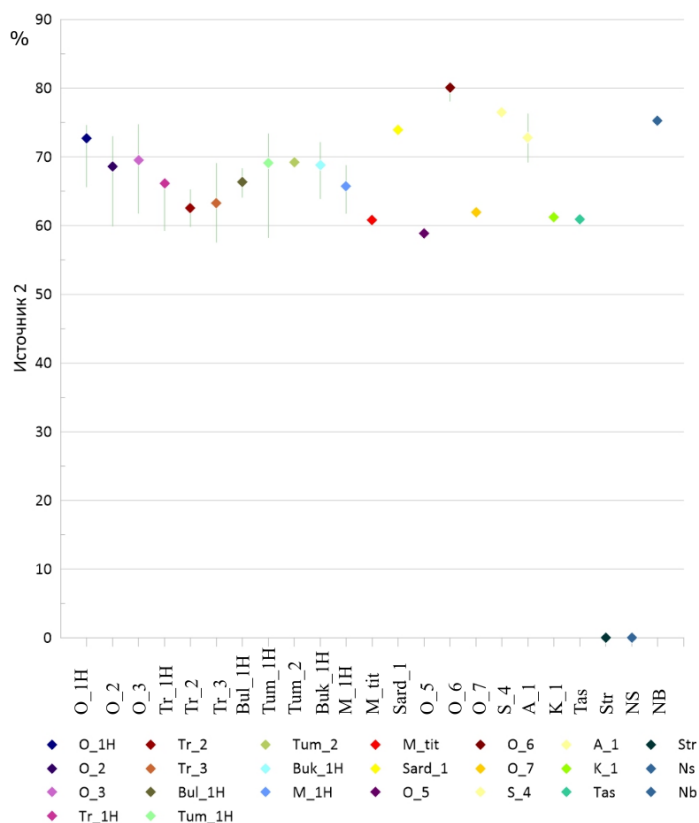


Рисунок 17. Значения долей вклада (%) вод атмосферного происхождения (источник 2) для створов гидрологических измерений в дельте реки Лены за период с 2005 по 2012 гг.

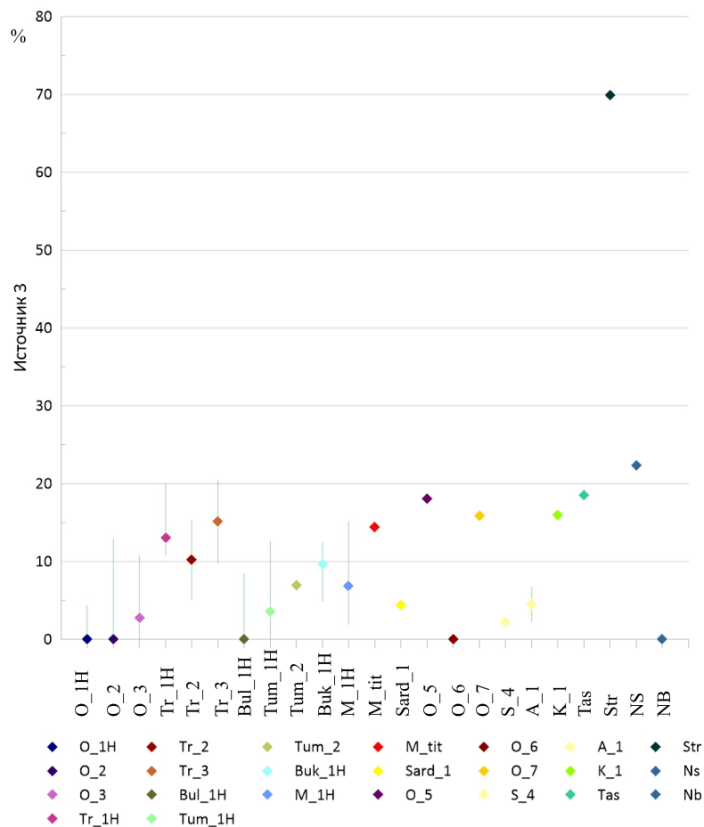


Рисунок 18. Значения долей вклада (%) грунтовых вод (источник 3) для створов гидрологических измерений в дельте реки Лены за период с 2005 по 2012 гг.

В таблице 2 представлены значения долей вкладов по створам за весь период наблюдений.

Медианное занижение доли атмосферных вод в речном стоке в дельте реки Лены составляет около 66%, что говорит о то, что данная фракция стока является преобладающей. Тем не менее, по графика, приведенным выше видно, что минимальные (близкие к 0) значения доли атмосферных вод, по видимому, характеризующих речной сток, поступающих в дельту со всего водосбора и формирующийся в основном за счет атмосферных осадков, наблюдаются для малых проток дельты (створы Str и NS). В основном же, доля речного стока в дельте (источник 2) является преобладающей и составляет от 60 до 80% общего стока ($C_v=0,15$).

Доля вклада талых мерзлотных вод в речной сток составляет около 20-30% ($C_v=0,2$).

Для разных проток колебания значений не являются очень большими. Среди рассматриваемых створов дельты можно выделить один, значение доли талых вод на котором составило почти 80%, что разительно отличается от других значений. К сожалению, на данный момент трудно определить природу данного явление. Для интерпретации необходимы дополнительные исследования. Доля вклада данного источника в речной сток в целом для дельты может быть охарактеризована медианным значением – 23%.

Доля третьей составляющей речного стока в дельте – грунтовые воды, имеет относительно более значительные колебания значений для разных створов дельты ($C_v=1,3$). Основная же часть значений составляет от 0 до 20 %. Из таблицы видно, что для некоторых створов Оленекской (О_1Н, О_2, О_6), Булкурской (Bul_1Н) и створа малого водотока (NB) значения вклада грунтового питания (источник 3) близко к нулю. А для створа Str, расположенного на малом водотоке, вклад грунтового питания составил 70%. В целом же для дельты грунтовые воды можно охарактеризовать медианным значением 6%.

Таблица 2. Доли вкладов различных источников в речной сток в дельте реки Лены (медианный значения за период наблюдений с 2005 по 2012 гг.)

Протока	Створ	Источник 1, %	Источник 2, %	Источник 3, %
Оленекская	О_1Н	23,9	72,7	0,0
Оленекская	О_2	23,0	68,6	0,0
Оленекская	О_3	22,2	69,5	2,7
Трофимовская	Tr_1Н	20,8	66,2	13,1
Трофимовская	Tr_2	27,3	62,6	10,2
Трофимовская	Tr_3	21,6	63,3	15,1
Булкурская	Bul_1Н	31,7	66,4	0,0
Туматская	Tum_1Н	29,6	69,2	3,5
Туматская	Tum_2	23,8	69,2	6,9
Быковская	Byk_1Н	24,6	68,8	9,7
Главное русло	M_1Н	22,1	65,7	6,9
Главное русло	M_tit	24,8	60,9	14,4
Сардахская	S_2	21,7	73,9	4,4
Оленекская	О_5	23,1	58,9	18,0
Оленекская	О_6	20,0	80,0	0,0
Оленекская	О_7	22,2	61,9	15,9
Сардахская	S_4	21,3	76,5	2,3
Ангардам-Уэся	A_1	22,8	72,8	4,5
Малые протоки	K_1	22,9	61,2	15,9
Малые протоки	Tas	20,5	60,9	18,6
Малые протоки	Str	30,1	0,0	69,9
Малые протоки	NS	77,6	0,0	22,4
Малые протоки	NB	24,7	75,3	0,0

Проведенное сравнение полученных в ходе моделирования результатов с ожидаемыми данными показывает, что результаты расчетов в целом соответствуют теоретическим представлениям. Это значит, что в целом модель ЕММА может применяться для объекта исследования, но необходима ее доработка для получения более надежных результатов.

3.5. Анализ полученных результатов

Полученные в ходе работы результаты позволяют сделать ряд заключений.

Для анализа данных было проведено сравнение изменения долей вклада рассматриваемых источников с изменением значений среднегодовой температуры. Для этого были использованы значения среднегодовых температур для станции Тикси (<https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>). Данное сравнение выявило, что с увеличением значений среднегодовой температуры наблюдалось увеличение доли вклада талых мерзлотных вод в речной сток.

Сопоставление долей вкладов источников в разные годы с данными о водности по годам показало, что в маловодные годы (2011) наблюдалось снижение доли вклада грунтового питания.

В результате сравнения данных о среднегодовом количестве осадков и значений вклада источников в речной сток, был сделан вывод, что, при увеличении количества осадков, увеличивается вклад грунтового питания.

Также было получено, что в очень многоводные годы (2005 и 2012) наблюдались большие доли вклада атмосферных осадков в речной сток, чем в маловодные (2011) и средневодные (2010) годы.

При помощи созданной ГИС «Lena_Delta_visualization» был проведен пространственный анализ данных исследования.

1) Пространственный анализ вклада источников.

Если анализировать пространственное распределение долей вкладов источников, то можно сделать вывод, что ближе к вершине дельты наблюдается более стабильный вклад грунтового питания, чем в других местах дельты. При этом доли вкладов источников в целом распределяются в пространстве достаточно равномерно.

Наибольшие вклады грунтового питания наблюдаются на малых протоках. В районах расположения ледового комплекса наблюдается снижение вклада грунтового питания.

2) Анализ гидрохимических характеристик.

Пространственный анализ по значениям концентраций основных ионов и микроэлементов:

- Si^{4+} : Максимальное значение концентраций наблюдается для створа главной протоки (M_tit). Также высокие значения наблюдаются для створа малого водотока (NS). Наименьшие значения наблюдаются, например, для створов проток Булкурской (Bul_1H) и Трофимовской (Tr_3, Tr_1H).
- Ba^{2+} : Можно сказать, что значения концентрации Ba^{2+} снижаются при движении в сторону устьевых областей. В малых водотоках наблюдаются наибольшие значения концентраций. В таких створах как для Оленекской протоки (O_6), протоки Ангардам-Уэся (A_1) и Сардахской протоки (S_2 и S_3) наблюдались значения близкие к нулю.
- SO_4^{2-} : Наблюдается достаточно равномерное распределение значений. Минимальные значения концентраций наблюдались в створе малого водотока (Str), а наибольшие в створе малого водотока NS.
- Sr^{2+} : Для малых проток наблюдается повышение значений концентраций, что может быть вызвано тем, что в их питании относительно большие доли грунтового питания. Максимальное значение концентрации наблюдается для створа малого водотока (NS). А минимальное значение концентрации наблюдается для створа Оленекской протоки (O_6), расположенного в устьевой области протоки. Значения концентраций для устьевых областей и главного русла ниже, чем для створов находящихся в протоках ближе к вершине дельты.
- Na^+ : Диапазон колебаний значений больше, чем для Sr^{2+} . Минимальные значения наблюдаются в малых водотоках Tas и Str. А максимальное значение наблюдается у створа малого водотока NS. Также можно сказать, что значения концентрации в главном русле и в устьевых областях проток меньше, чем значения для створов, расположенных в протоках ближе к вершине дельты.
- Ca^{2+} : Распределение значений концентраций в пространстве относительно равномерное. Наибольшие значения концентраций наблюдаются в малых водотоках NS и Str.
- Среди главных ионов одними из наибольших концентраций обладают ионы Ca^{2+} и SO_4^{2-} . А среди микроэлементов – Si^{4+} и Sr^{2+} .
Значения минерализации сильнее всего коррелируют со значениями Ca^{2+} .

Таким образом, можно сделать вывод, что в рассматриваемый в работе период времени данные имели относительно равномерное распределение. При этом на малых водотоках наблюдается влияние талых вод, грунтового питания.

Заключение

В рамках выпускной квалификационной работы проведен пространственный анализ гидрохимических характеристик дельты реки Лены, а также рассчитаны основные составляющие речного стока. Для решения поставленной цели были проделано следующее:

- проанализированы различные литературные материалы по теме исследования;
- проведен разбор основных характерных черт объекта исследования;
- проведена работа с «Базой данных для гидролого-геохимических характеристик дельты реки Лены», в ходе которой были отобраны и подготовлены данные для проведения исследования;
- проведен выбор программного продукта для создания ГИС – им стал QGIS;
- создана ГИС, получившая название «Lena_Delta_visualization». В ГИС содержится ряд данных для различных створов дельты Лены за рассматриваемый период времени;
- В ходе анализа гидрохимических данных, была рассмотрена модель ЕММА, в которой при помощи набора трассеров была получена информация о составляющих речного стока, определены доли вкладов отдельных составляющих (фракций) речного стока. В работе был проведен анализ данной модели, ее алгоритма, актуальности и возможности применения для данного исследования.

Таким образом, в результате проделанной работы было выявлено, что для дельты реки Лены талые мерзлотные воды формируют около 20–30%, атмосферные осадки (снеговые и дождевые) – 60–80%, а грунтовые воды активно-талого слоя – от 0 до 20%. Сравнение полученных результатов с имеющимися в научной литературе данными для объектов исследования такого типа показало применимость данной модели для дельты реки Лены. Тем не менее, необходима доработка модели для получения более качественных результатов, также сбора дополнительных сведений по малым протокам дельны для возможности интерпретации результатов.

Полученные в результате применения модели данные были добавлены в созданную ГИС. В ней был проведен анализ распределения гидрохимических характеристик и значений вклада источников в пространстве. Созданная ГИС значительно упрощает проведение анализа результатов исследований, благодаря тому, что в ней содержатся совокупность необходимых сведений об объекте, которая имеет наглядное представление. Также анализ упрощает то, что, используя возможности, заложенные в ГИС, можно оперативно проводить вычисления, получать статистическое описание данных и т.д.

Таким образом, в результате данной работы создана функциональная ГИС «Lena_Delta_visualization», проведены модельные расчеты с помощью модели End-Member Mixing Analysis (EMMA) и выполнен пространственный анализ гидрохимических данных. Поставленные перед автором выпускной квалификационной работы задачи были выполнены в полном объеме.

Список литературы

Книги:

1. Большаинов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.

Монографии:

- а. Сучкова, К. В. Моделирование генетических составляющих речного стока на водосборе Можайского водохранилища : специальность 25.00.27 " Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия" : диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук / К. В. Сучкова ; науч. рук. работы Ю. Г. Мотовилов ; Институт водных проблем Российской академии наук. - Москва, 2021. - С. 157.

Статьи в сборниках:

1. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Айбулатов Д.Н. Особенности и оценки пространственно-временной изменчивости речного стока в многорукавной дельте р. Лены // Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики. - М., 2016. - Т. 2. - С. 65-95.
2. Siegert, C. , Kunitsky, V. V. and Schirmermeister, L. (2009): Ice Complex deposits - A data archive for the reconstruction of climate and ecology at the Laptev Sea coast during the Late Pleistocene (Otlozheniya ledovogo kompleksa - arkhiv dannykh dlya rekonstruktsiya klimata i ekologii na proberezhe morya Laptevykh v pozdnem pleistotsene) , Kassens, H. et al. System of the Laptev Sea and the adjacent arctic seas - modern and past environments (Sistema morya Laptevykh i prilegayushchikh mopei Arktiki). Moscow University Press.

Статьи в журналах:

1. Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Куксина Л.В., Четверова А.А. Структура водотоков в дельте Лены и ее влияние на процессы трансформации речного стока // География и природные ресурсы. - 2014. - № 1. - С. 91-99.
3. Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С. Динамика рельефа и сейсмотектоническая активизация новейших структур дельты реки Лена // Геотектоника. 2019. - № 5. - С. 56-71.
4. Кандрюкова Н. А. Геоморфологическая и линеаментная структура дельты реки Лены по материалам дистанционной съемки // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2014. - №1. - С. 169-176.
5. Кичигина Н.В., Губарева Т.С., Шапов В.В., Гарцман Б.И. Трассерные исследования формирования речного стока в бассейне озера Байкал // География и природные ресурсы. 2016. - № 5. - С. 60-69.

6. Коротчаев В. Н. Голоценовая история речных дельт арктического побережья Сибири // География и природные ресурсы. 2011. - №3. - С. 13-20.
7. Семенец Е.С., Свистов П.Ф., Талаш А.С. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 3. 27-36.
8. Федорова И.В., Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Третьяков М.В., Четверова А.А. Современное гидрологическое состояние дельты р. Лены // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 278-291.
9. Фомина Е.Е. Факторный анализ и категориальный метод главных компонент: сравнительный анализ и практическое применение для обработки результатов анкетирования. // Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Гуманитарный вестник, 2017, вып. 10. С. 1-16.
10. Четверова А. А., Федорова И. В., Фролова Л. А., Нигаматзянова Г. Р., Скороспехова Т. В., Шадрина А. А. Особенности формирования качественных характеристик вод и наносов в дельте реки Лены // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2017. Т.159, №1. С.122-138.
11. Barthold, Frauke & Tyralla, Christoph & Schneider, Katrin & Vaché, Kellie & Hans-Georg, Frede, & Breuer, Lutz. (2011). How many tracers do we need for end member mixing analysis (EMMA)? A sensitivity analysis. Water Resources Research. 47. 10.1029/2011WR010604.
12. Burns, Douglas & McDonnell, Jeffrey & Hooper, Richard & Peters, Norman & Freer, James & Kendall, Carol & Beven, Keith. (2001). Quantifying Contributions to Storm Runoff Through End-Member Mixing Analysis and Hydrologic Measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA). Hydrological Processes. 15. 1903 - 1924. 10.1002/hyp.246.
13. Dolgoplova, E.N., Isupova, M.V. Formation Conditions of Runoff and Hydrological-Morphological Processes in Deltas in Permafrost Zone: The Deltas of the Lena and Mackenzie Rivers. Water Resour 48, 485–501 (2021).
14. Inamdar S. (2011) The Use of Geochemical Mixing Models to Derive Runoff Sources and Hydrologic Flow Paths. In: Levia D., Carlyle-Moses D., Tanaka T. (eds) Forest Hydrology and Biogeochemistry. Ecological Studies (Analysis and Synthesis), vol 216. Springer, Dordrecht.
15. Liu, F., M. W. Williams, and N. Caine (2004), Source waters and flow paths in an alpine catchment, Colorado Front Range, United States, Water Resources Research, 40, W09401.

16. Ma, Q., Jin, H., Bense, V.F., Luo, D., Marchenko, S.S., Harris, S.A., & Lan, Y. (2019). Impacts of degrading permafrost on streamflow in the source area of Yellow River on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Advances in Climate Change Research*, 10, 225-239.

Материалы конференций:

1. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Болдескул А.Г., Шамов В.В., Луценко Т.Н., Солопов Н.В., Кожевникова Н.К. Адаптация 4-х компонентной модели смешения природных вод с использованием гидрохимических трассеров на примере бассейнов малых рек в Приморье // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы II Всероссийской научной конференции с международным участием. Владивосток. 2015. С.134-138.
2. Исупова М. В., Долгополова Е. Н. Особенности гидрологического режима Арктических дельт в условиях изменяющихся климатических характеристик // Институт водных проблем РАН, Россия // VII Всероссийский гидрологический съезд. СПб. 2013.
3. Четверова А. А., Потапова Т. М., Федорова И. В. Геохимический сток арктических рек на примере рек Западной Сибири и реки Лена // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана. Материалы IV Школы-конференции молодых ученых с международным участием (26 - 28 августа 2011 г.). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. С. 83-88.

Учебно – методические пособия:

1. Изакова, Н. Б. Маркетинговые исследования с применением пакета SPSS: учеб. пособие / Н. Б. Изакова, А. Ю. Журавлева ; М-во образования и науки РФ, Урал. гос. экон. ун-т. - Екатеринбург: Изд-во УрГЭУ, 2013. - 134 с.
2. Ресурсы поверхностных вод СССР [Текст] / Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР... - Ленинград : Гидрометеиздат, - Т. 17: Лено-Индигирский район / Сост. д-р геол.-минерал. наук О. Н. Толстихин, С. А. Изюменко, техн. З. К. Егорова [и др.] ; Под ред. канд. геогр. наук М. С. Протасьева. - 1972. - 651 с., 2 л. схем., карт. : ил., карт.
3. Савицкая Г. В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия: Учеб. пособие / Г.В. Савицкая. - 7-е изд., испр. - Мн.: Новое знание, 2002 - 704 с. - (Экономическое образование).
4. Сербенюк, Сергей Николаевич. Картография и геоинформатика - их взаимодействие / С. Н. Сербенюк; Под ред. В. А. Садовниченко; МГУ им. М. В. Ломоносова, Геогр. фак. - М. : Изд-во МГУ, 1990. - 157,[1] с. : ил.

5. Соколов, Алексей Александрович. Гидрография СССР: (Воды суши) : [Учеб. пособие для гидрометеорол. техникумов]. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1952. - 472 с., 5 л. черт., карт. : ил., карт.; 23 см.

Справочные пособия:

1. Водно-болотные угодья России. Том 3. Водно-болотные угодья, внесенные в Перспективный список Рамсарской конвенции. - М. : Wetlands International Global Series No. 3, 2000. - 490 с.
2. Дорофеев В. И. Тундра // Большая российская энциклопедия. Том 32. Москва, 2016, стр. 501.

Базы данных:

1. Четверова, А. А., Федорова, И. В., Боброва, О. Н., Убович, С., & Алексеева, Н. К. (2019). База данных для гидролого-геохимических характеристик дельты реки Лены (Lena Delta Hydrogeochemistry).

Интернет – ресурсы:

1. URL: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm> – Электронный учебник по статистике, StatSoft, Inc. (2012). Электронный учебник по статистике. Москва, StatSoft. (дата обращения: 15.05.2022).
2. URL: https://nafi.ru/upload/spss/Lecture_8.pdf – Факторный анализ (дата обращения: 15.05.2022).
3. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/> – Climate Data Online (дата обращения: 15.05.2022).
4. URL: <https://slideplayer.com/slide/10477042/> – End-member mixing analysis: principles and examples. Fengjing Liu, University of California, Merced. (дата обращения: 15.05.2022).
5. URL: <https://slideplayer.com/slide/4954067/> – Mixing models and end-member mixing analysis: principles and examples. Matt Miller and Nick Sisolak, Slides Contributed by: Mark Williams and Fengjing Liu. (дата обращения: 15.05.2022).
6. URL: <https://www.openstreetmap.org/> – OpenStreetMap (дата обращения: 15.05.2022).
7. URL: <https://www.qgis.org/ru/site/> – QGIS (дата обращения: 15.05.2022)
8. URL: <https://www.usgs.gov/media/images/lena-delta> – Lena Delta (дата обращения: 15.05.2022).