



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрологии суши

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: **Уровенный режим оз. Ньяса**

Исполнитель Комбою Жоаким Эгаш Мониж
ПГ-Б13-2-4

Руководитель к.г.н., доцент
Тимофеева Лариса Александровна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой к.г.н., доцент
Сикан Александр Владимирович

«20» июня 2017 г.

Санкт-Петербург
2017

Комбою Э.М.К

Уровенный режим оз. Ньяса

Физико-географическая характеристика озера и его водосбора.....	5
История открытия оз. Ньяса.....	6
Климат территории водосбора.....	7
Температура воздуха.....	8
Осадки.....	8
Геологическое строение и рельеф.....	9
Геологические особенности.....	10
Рельеф водосбора озера.....	11
Почвы и растительный покров.....	12
Гидрографическая сеть.....	12
Общая характеристика оз. Ньяса.....	14
Котловина оз. Ньяса.....	16
Характеристики водной массы.....	17
Экосистема озера.....	19
Водный баланс и водообмен оз. Ньяса.....	27
Уровенный режим озера Ньяса в прошлом и настоящем: результаты ранее выполненных исследований.....	28
Обработка исходных данных: методы, результаты и анализ.....	32
Статистический анализ.....	48
Квантильный анализ и фильтрация Баттерворта.....	55
Индекс Де-Мартона.....	58
Внутригодовая изменчивость количества осадков.....	61
Анализ межгодовой и внутригодовой изменчивости уровня Ньяса.....	61
Моделирование зоны затопления с помощью ArcGIS.....	62
Характеристики котловин водоемов.....	62
Батиграфическая и объемная кривые.....	64
.ArcGIS и цифровая модель рельефа.....	64
Заключение.....	71
Использованные источники.....	73

Введение

На земном шаре около 12 млн. озер, которые расположены на всех континентах. В Восточной Африке находятся Великие озера рифтовой зоны, среди которых – трансграничное оз. Ньяса (Малави). Водосбор озера ($100\,500\text{ км}^2$) разделён между Малави, Мозамбиком и Танзанией. По площади акватории ($29\,500\text{ км}^2$) Ньяса занимает седьмое место среди пресных озер Земли; по глубине – третье (средняя глубина 296 м), по объёму ($8\,400\text{ км}^3$) – пятое.

В 1984 г. озеро было внесено в список всемирного наследия ЮНЕСКО (Организация Объединённых Наций по вопросам образования, науки и культуры), что стало признанием ценности не только его водных ресурсов, но и уникальности гидроэкосистемы, которой нет равных по биоразнообразию. Её сохранение требует непрерывного мониторинга характеристик гидрологического режима, в том числе и уровня водной поверхности – важного абиотического фактора устойчивого состояния водоёма. Уровень оз. Ньяса может быстро и значительно изменяться, что, в сочетании с другими факторами, приводит к разрушительным наводнениям, негативно влияющих на экосистему озера, приводящим к жертвам среди населения прибрежных районов и экономическому ущербу. Так, в январе 2015 г. после необычайно сильных дождей только в Малави было затоплено более 650 км^2 вдоль вытекающей из Ньяса р. Шире, 638 000 человек пострадало.

В связи с этим, цель работы – исследование закономерностей и особенностей уровня озера – является актуальной и представляет практический интерес.

Для достижения цели нужно выполнить следующие задачи:

- ознакомиться с историей изменения уровня оз. Ньяса по научным литературным источникам;
- собрать многолетние данные об уровне водной поверхности озера и метеорологических элементах;

- проанализировать и обработать собранные данные;
- смоделировать зоны затопления при уровнях различной обеспеченности;
- проанализировать полученные результаты с целью выявления закономерностей, особенностей и последствий изменений уровня озера.

Данные о температуре воздуха и количестве осадков получены из открытых источников, массив значений уровня воды озера включает ассимилированные данные, в том числе данные спутниковой альтиметрии (1993-2015 гг.). Для обработки исходных данных используются общепринятые методы статистического анализа, квантильный анализ, фильтр Баттерворта. Цифровая модель рельефа прибрежной территории, необходимая для определения зон возможного затопления и их площадей, создаётся с помощью ArcGIS и топографических карт местности масштаба 1:500 000. В AutoCAD построены объёмная и батиграфическая кривые.

В ходе исследования выявлены тенденции изменения температуры воздуха, осадков и уровней воды озера. Тренд на повышение уровня подтверждается трендом многолетнего ряда индекса Де Мартона. Предполагается существенное влияние автокорреляции уровней и подземных вод на формирование уровенного режима озера. Определённые по цифровой модели рельефа площади зон затопления при различных уровнях сравнены с фактическими данными.

1 Физико-географическая характеристика озера и его водосбора

Озеро Ньяса (Малави) – наиболее южное из озёр Восточно-Африканской рифтовой долины, третье по площади и второе по глубине (максимальная глубина – 706 м) среди них. Его координаты: 9°30'-14°30' ю.ш. и 33°57'-34°51' в.д.; урез воды находится на высоте 472 м над уровнем моря (н.у.м.). По берегам озера расположены Малави, Танзания и Мозамбик, две первые из них контролируют 79 и 21% его водной поверхности соответственно (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 Озеро Ньяса на карте Африки.

Озеро Ньяса возникло несколько миллионов лет назад и является одним из 20 древнейших озёр на Земле. Его воды заполняют трещину в земной коре на южной оконечности большой рифтовой долины. Озеро

вытянуто с севера на юг на 580 км, а его ширина изменяется от 16 до 75 км. Длина береговой линии составляет около 1 245 км. Озеро содержит 7% мировых запасов пресной воды и обладает уникальной экосистемой, характеризующейся высоким биоразнообразием.

1.1 История открытия оз. Ньяса

На языке народа Яо, издавна населявшего берега озера на западе Малави, «Ньяса» означает просто «озеро». Но у него есть и много других имен.

О существовании громадного озера в этой части Африки европейцы знали с древних времён. Уже в XVII-XVIII вв. контуры озера были нанесены на карты со слов арабских торговцев. Тогда оно было известно как Зафлан, Замбре, Хемозура и Марави. Первым из европейцев это озеро в 1616 г. увидел португальский путешественник Гашпар Букарру, но сведения о его открытии затерялись в португальских государственных архивах, а его имя было надолго забыто.

В 1859 г знаменитый исследователь Африки Дэвид Ливингстон исследовал р. Шире, добрался по ней до южного берега озера и обозначил его на карте как Ньяса. В 1964 г. Ньясаленд – бывшая колония Англии – получила независимость и стала называть себя Малави, а озеро – оз. Малави. Но жители Мозамбика называют его Ниасса, на португальский манер [Румянцев, Драбкова и Измайлова, 2012].

1.2 Климат территории водосбора

1.2.1 Температура воздуха

Водосбор оз. Ньяса находится в зоне тропического климата, характеризующегося, несмотря на близость к зоне экваториальных муссонов, наличием сезонных изменений температуры, направления и скорости ветра и количества осадков. Годовой ход температуры позволяет выделить два

сезона: теплый, продолжающийся с сентября по апрель, и прохладный – с мая по август.

Средняя годовая температура изменяется от +20 °С в горах до +27 °С на побережье. В январе регистрируемый на разных метеостанциях региона максимум составляет от +28 °С до +30 °С, минимум от +21,3 °С до +21,9 °С, в июле максимум составляет от +25 °С до +27 °С и минимум от +13,5 °С до +15,5 °С. Над акваторией озера наблюдаются частые изменения температуры, количества осадков, направлений и скорости ветра [Румянцев, Драбкова и Измайлова, 2012].

1.2.2 Осадки

Суммарное годовое количество осадков, выпадающих на поверхность озера, изменяется от 650 мм в южном регионе Малави (г. Мангочи) до 2000 мм в прилегающих горных районах. Сезон дождей длится с декабря по апрель. В остальную часть года осадков почти не выпадает. Однако в сухом сезоне можно выделить прохладный период (май – август) и тёплый период (сентябрь – ноябрь). Измерения количества осадков на побережье и на островах показали, что в середине озера выпадает примерно на 30% больше осадков, чем по его берегам. Из-за климатических изменений в юго-восточной Африке, а также вырубки лесов на водосборе, количество и частота осадков заметно сократилась (рисунок 1.2). Это снижает уровень рек и площади озёр, в том числе оз. Ньяса. Из-за участвовавших засух значительно сократилась площадь пастбищ, что оказывает крайне негативное воздействие на домашний скот. Все это ставит под угрозу жизнь и здоровье миллионов людей, живущих вблизи оз. Ньяса (около 10 млн чел.). С другой стороны, слишком обильные осадки могут вызвать неконтролируемый подъём уровней в водотоках и водоёмах равнинной южной части водосбора, что может привести к наводнениям, также негативно влияющим на жизнедеятельность в этих частях водосбора озера. [Румянцев, Драбкова и Измайлова, 2012].

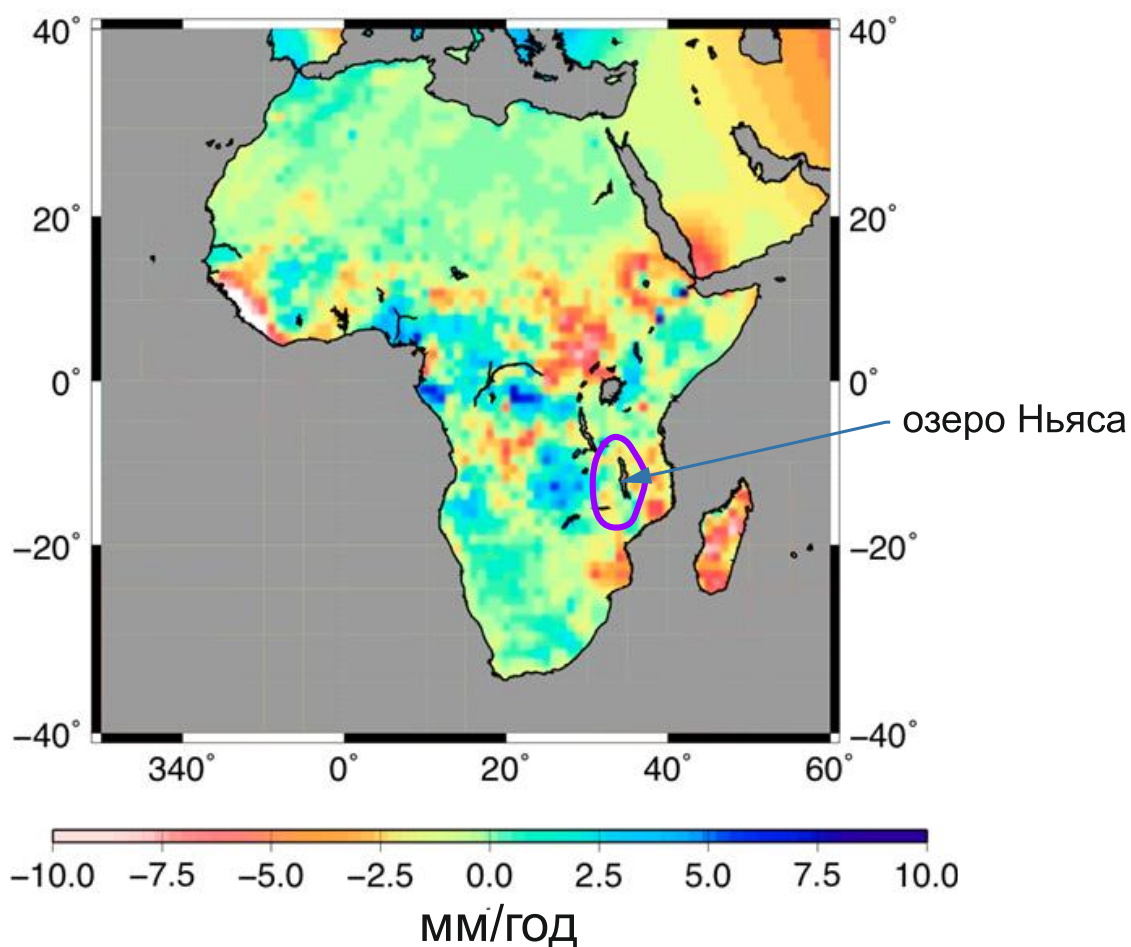


Рисунок 1.2 Карта изменение осадков в Африке [Ramillien, 2014]

1.3 Геологическое строение и рельеф

1.3.1 Геологические особенности

Водосбор оз. Ньяса расположен в юго-восточной части докембрийской Африканской платформы. Большая его часть относится к Мозамбикскому гранулитно-гнейсовому поясу, породы которого представлены архейскими гнейсами, прорванными анортозитами раннего протерозоя, щелочными гранитами позднего протерозоя, массивами меловых карбонатитов и сиенитов. На юге выделяют кратон Тете, сложенный архейскими гранито-гнейсами, среди которых расположено несколько зон с отложениями нижнего протерозоя. На крайнем севере прослеживается окончание Ирумидского складчатого пояса Замбии, образованного кварцито-сланцами

нижнего и среднего протерозоя (возраст 1,8 – 1,3 млрд лет). К западу от оз. Ньяса распространены пермско – триасовые континентальные угленосные, а также меловые мелководно-морские отложения платформенного чехла. В плиоцен-четвертичное время в восточной части рассматриваемой территории возник грабен оз. Ньяса, который постепенно заполняется речными и озёрными отложениями [Carter 1987].

1.3.2 Рельеф водосбора озера

Водосбор оз. Ньяса представляет собой преимущественно горную местность, вытянутую меридионально вдоль грабена оз. Ньяса, занимающего восточную часть региона и входящего в Восточно-Африканскую рифтовую систему. На большей части территории распространены цокольные денудационные плоскогорья с преобладающими высотами 1 000–1 500 м н.у.м. Западные районы значительно выше окружающей местности. На севере находится плато Ньика (высота до 2 670 м н.у.м.), сильно расчленённое сбросами. В центре также преобладают плато, на юге – горы Дедза (высота до 2 198 м н.у.м.). К востоку от плоскогорий расположены равнины с высотами 500-1000 м. Вдоль побережья озера тянутся узкие озёрные аккумулятивные равнины высотой до 500 м, отражающие различные положения палеоуровня озера. К югу от озера днище грабена занято аккумулятивно-денудационной равниной верхнего течения р. Шире с оз. Маломбею. В среднем течении находится равнина с высотами менее 200 м, затем – равнина нижней Шире. К югу абсолютная высота дна понижается, достигая самой низкой отметки на границе с Мозамбиком (37 м). Остальная часть южной части озера занята денудационными равнинами, осложнёнными останцовыми горами – инзельбергами, крупнейший из которых – горный массив Муладже (гора Сапитва, высота до 3 002 м) на крайнем юго-востоке. На левобережье р. Шире хорошо выражены поднятие Зомба и блоковый массив Шире. В юго-восточной части территории находится заболоченная аккумулятивная равнина озёр Чилва и Чиута [Carter 1987].

1.4 Почвы и растительный покров

В северной и центральной частях водосбора озера распространены горные красные почвы. На плато Лилонгве и в южной части территории преобладают красно-жёлтые ферраллитные почвы. В долинах крупных рек и на озёрных низменностях распространены аллювиальные и болотные тропические почвы. Наиболее плодородны вертисоли, формирующиеся на озёрных равнинах и равнине нижней Шире. Значительные уклоны местности и активная хозяйственная деятельность способствуют почвенной эрозии, которой сильно подвержено 30% общей площади территории.

Около 20% территории водосбора озера покрыто лесами; в северной части преобладают сезонно-влажные, на остальной территории – сухие листопадные леса.

В горах выражена высотная зональность. Выше 2 000 м – горно-луговые ландшафты. Из-за значительных темпов сельскохозяйственного освоения сильно развиты процессы обезлесения. Около 37% территории водосбора занимают саванны, редколесья и злаковники. На юге территории распространены сухие редколесья мопане (с преобладанием дерева мопане) и миомбо (с преобладанием брахистегии). Обширные площади заняты травяными, парковыми и акациевыми саваннами с баобабом. В центральной части находятся влажные заболоченные леса, в которых часто встречаются рафиевая и масляная пальмы. В долинах рек распространены галерейные леса, влажные саванны и болота.

Флора территории насчитывает свыше 3700 видов высших растений, из них 13 находятся под угрозой исчезновения. Наиболее разнообразны горные сезонно-влажные леса массива Муландже, где присутствуют не только широколиственные виды, но и южные хвойные – можжевельник и виддрингтония [Carter 1987].

1.5 Гидрографическая сеть

В оз. Ньяса впадают 14 крупных рек, самой многоводной из которых является р. Рухуху, обеспечивающая около 20% речного притока. Другие крупные притоки – р. Сонгве, Двангва, Северная Рукуру, Бва, Южная Рукуру, Лилонгве, Лилова (рисунок 1.3). С речным притоком в озеро поступает 29 км³ воды в год (43%), с осадками – 39 км³ (57%); с поверхности озера испаряется 57 км³ (84%).

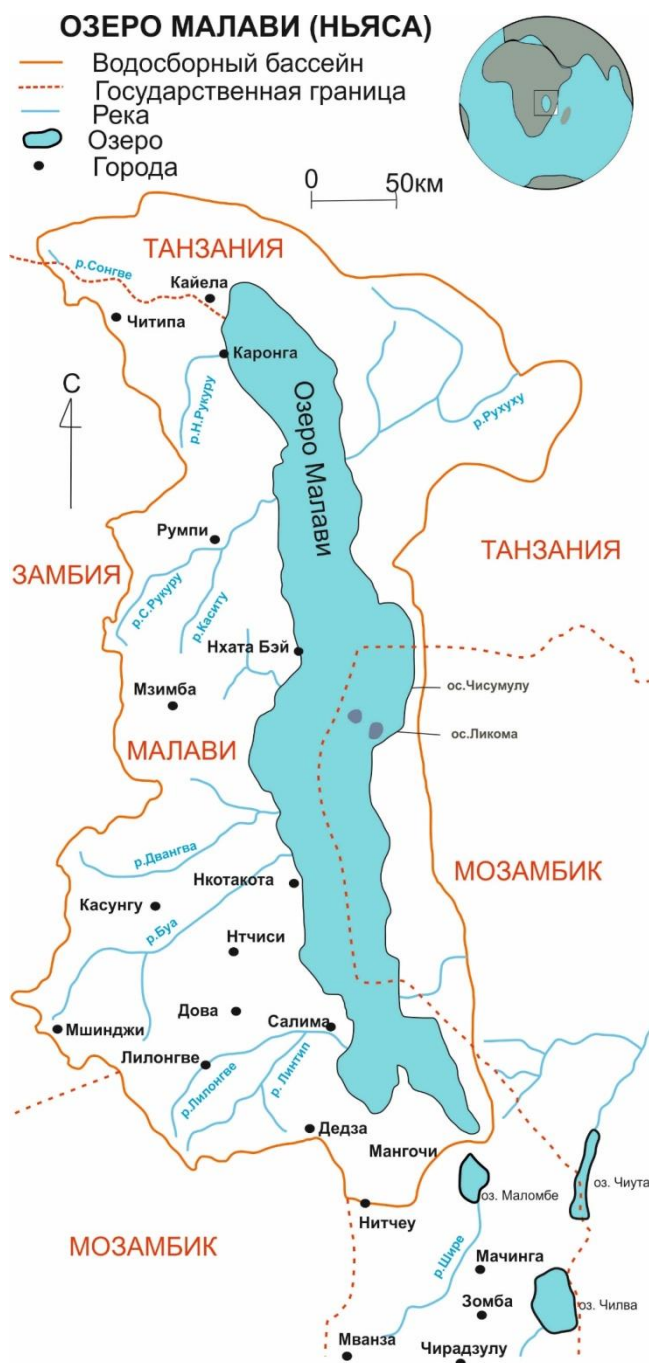


Рисунок 1.3 Схема водосбор оз. Ньяса [Bootsma and Neeky, 2003]

Озеро сточное, из него вытекает р. Шире, левый приток р. Замбези. Таким образом, озеро играет важную роль в гидрографической сети Замбези. В связи с тем, что р. Шире обеспечивает очень небольшой сток, всего 16% из всей поступающей воды за год, и большая часть воды испаряется с поверхности, водообмен происходит медленно. По некоторым оценкам, вода в озере обновляется за 114 лет, что делает его крайне уязвимым перед различными видами загрязнения, в частности, химическим, поскольку попадающие в озеро контаминанты остаются в нём длительное время [Румянцев, Драбкова и Измайлова, 2012].

2 Общая характеристика оз. Ньяса

2.1 Котловина оз. Ньяса

Озерная котловина Ньяса возникла несколько миллионов лет назад в месте тектонического рифта, образовавшегося вследствие сейсмической активности. То есть происхождение озера Ньяса связано с мощным разломом земной коры – Восточно-Африканским грабеном (рисунок 2.1). Как правило, такие озера самые крупные и глубокие. По некоторым данным, котловина озера продолжает увеличиваться до настоящего времени.



Рисунок 2.1 Карта спутниковый снимок оз. Ньяса и прилегающей территории

Котловина озера достаточно однородна, хотя можно отметить, что её южная часть более мелкая (до 200 м) (рисунок 2.2). Наибольшие глубины находятся в северо-западной части озера (706 м). На северо-востоке берега часто отвесные и скалистые, литораль отсутствует. Средняя глубина озера 296 м.

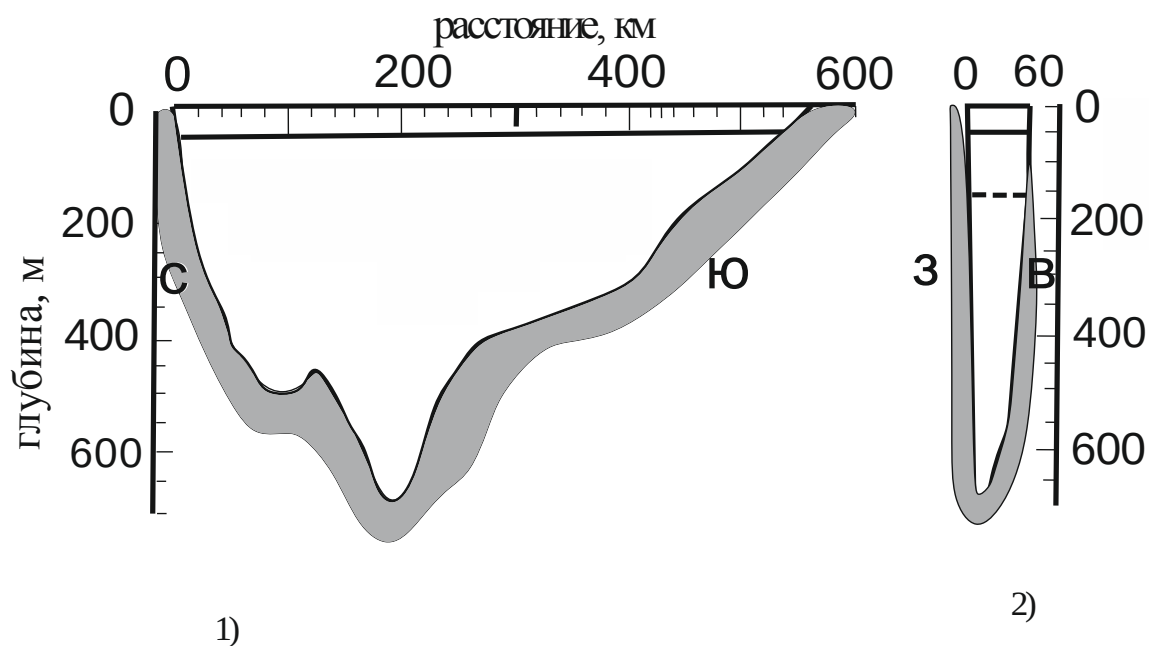


Рисунок 2.2 Поперечный разрез озера: 1) с севера на юг; 2) с запада на восток [Johnson and Odada, 1996]

2.2 Характеристики водной массы

Озеро Ньяса относится к меромиктическим водоемам, для него характерна устойчивая, но периодически ослабленная температурная стратификация с небольшим температурным градиентом. Температуры поверхности озера (эпилимнион) в течение года изменяется от $+23,5^{\circ}\text{C}$ до $+28,5^{\circ}\text{C}$, тогда как на глубинах больших 300 м (гиполимнион) весь год удерживается температура воды $+22^{\circ}\text{C}$ (рисунок 2.3).

Открытые воды оз. Ньяса характеризуются высокой прозрачностью, от 13 до 23 м, в зависимости от сезона. Прибрежные воды более мутные, особенно в период дождей. Минерализация невысокая, электропроводность 210-285 $\mu\text{S}/\text{cm}$; жесткость по кальцию 107-142 мг/л; реакция среды щелочная, 7,7-8,6. Для верхнего 100-метрового слоя характерны достаточно высокие концентрации кислорода, но на глубине более 200 м кислород практически всегда отсутствует [Румянцев, Драбкова и Измайлова, 2012].

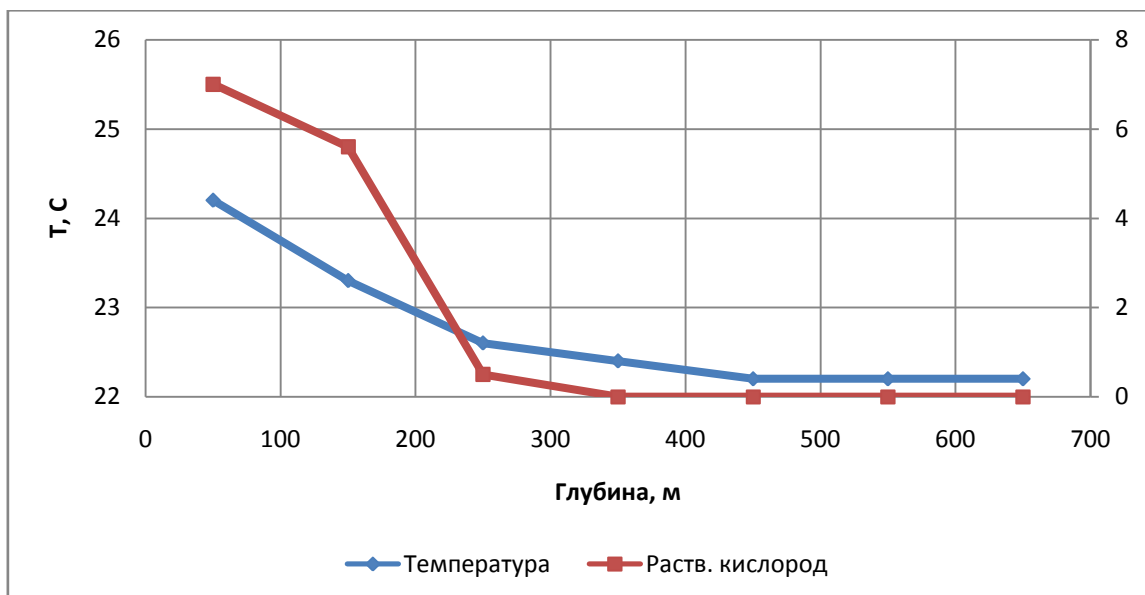


Рисунок 2.3 График изменение температуры воды и концентрации кислорода оз. Ньяса с глубиной (по данным ILEC).

В оз. Ньяса, как и в оз. Танганьика, основная масса биогенного вещества сконцентрирована в гипolimнионе. В поверхностные слои биогенное вещество поступает в процессе перемешивания, в периоды повышенной ветровой деятельности. Наиболее сильные ветры наблюдаются в зимний период, с мая по октябрь, когда в регионе господствуют юго-восточные пассаты, врывающиеся в узкий, открытый к югу грабен Ньяса как в аэродинамическую трубу. В это время года в южной части озера практически вся водная масса перемешивается, а в северной – верхний 400 метровый слой, охватывающий как эпи-, так и мета- и гипolimнион. В результате, южная часть озера является более производительной, особенно к концу сезона с интенсивными ветрами. По трофическому статусу оз. Ньяса является переходным от олиготрофного к мезотрофному. Согласно данным International Lake Environmental Committee (ILEC), концентрация хлорофилла-а в эпилимнионе составляет 0,2-0,7 мкг/л. Систематических детальных наблюдений за качеством воды оз. Ньяса не проводилось.

2.3 Экосистема озера

Традиционные малавийские религии считают оз. Ньяса «источником всего живого». По разнообразию рыбных запасов оз. Ньяса первое в мире: здесь обитает до 1 000 видов рыб (до 90% это цихлиды: рыбы из отряда окунеобразных). Хищные виды обитают вдали от берега, на глубине; прочие живут в прибрежной зоне. Значительная их часть – эндемики.

Основной объект озерного рыболовства – цихлиды, они обеспечивают питанием значительную часть населения Малави. Особая статья местной экономики – декоративные виды рыб, которые отправляются на экспорт, для аквариумистов. Этих ярких рыбок либо ловят, либо разводят в специальных садках.

Для местной фауны характерно наличие большого количества крокодилов и гиппопотамов. Изобилие рыбы вызвало создание устойчивой популяции африканских орланов-бвонго, основой рациона которых она является. Вдоль северного берега озера расположены густые заросли папируса, в которых гнездятся зимородки и бакланы, также питающиеся исключительно рыбой. Присущее только оз. Ньяса явление – ежегодный массовый вылет озерных мух, личинки которых живут на дне в мелководных частях озера.

Местное население занимается, главным образом, рыболовством и обслуживанием туристов. Рыбаки вылавывают примерно 7 000 тонн рыбы в год. Основная часть улова – утака, чисавасава и чамбо – употребляется в пищу в сушеном виде, некоторое количество экспортируется. Величина улова неуклонно сокращается вследствие чрезмерного вылова и применения запрещенных средств для добычи рыбы небольшого размера, в результате чего гибнет рыба молодь.

Местные власти уверены, что при сохранении нынешних темпов прироста населения даже крупный улов вдали от берегов, где на глубине обнаружены значительные рыбные запасы, не способен обеспечить население достаточным объёмом питания.

Не смотря на значительные нагрузки, биоразнообразие экосистемы озера пока не уменьшается, хотя вылов, изменение сообщества планктона и снижение качества воды могут его уменьшить. Исследование состава донных отложений показало, что биогенная нагрузка на озеро может увеличиться [Bootsma 1996].

2.3 Водный баланс и водообмен оз. Ньяса

Водный баланс озер во много отличается от водного баланса водотоков. Водный баланс отражает совокупное воздействие всех факторов, влияющих на изменение запасов воды в озере. Результирующей составляющей является уровень воды, который фиксирует водные ресурсы водоёма.

Уравнение водного баланса включает приходные, расходные и аккумуляционные элементы, временная изменчивость которых приводит к изменчивости уровней озер.

В водном балансе оз. Ньяса преобладают испарение и осадки (таблица 2.1), следовательно, оно является испарительно-дождевым. с учётом длительного периода водообмена – 114 лет – и незначительного удельного водосбора (отношение площади водосбора озера к его площади), озеро очень чувствительно к изменениям климата. При нарушении соотношения между испарением и осадками происходит быстрое изменение уровня. В случае его повышения может быть затоплена юго-восточная часть водосбора.

Водный баланс озера хорошо изучен, результаты, полученные ранее, представлены в Таблице 2.1

Таблица 2.1 Оценки элементов водного баланса оз. Ньяса

Организация	Kidd (1983)	Neuland (1984)	Drayton (1984)
Период	1954-1979	1954-1979	1953-1974
Осадки на поверхность озера (мм)	1 414	1 374	1 350
Приток в озеро (мм)	1 000	693	693
Испарение с поверхности озера (мм)	1 872	1 605	1 610
Отток из озера (мм)	418	404	334
Изменение запасов воды в озере (аккумуляция)	+112	+58	+59

Уравнение водного баланса дает возможность оценить интенсивность внешнего водообмена водоёмов – показателя длительности пребывания в котловине поступившей воды. Этот показатель является одной из важнейших характеристик гидрологического и биологического режимов водоемов [Kumambala and Ervine 2010].

В качестве основной характеристики внешнего водообмена принят показатель условного водообмена, рассчитываемый по формуле:

$$K_{\text{в}} = \frac{W_{\text{ос.}} + W_{\text{пр.}}}{W_{\text{оз.}}}, \quad (2.1)$$

Значения $K_{\text{в}}$ изменяются в широких пределах и зависят от географического положения системы, т.е. от степени увлажненности территории, от величины удельного водосбора и размеров котловины. Так, для проточных озёр зоны избыточного увлажнения (гумидного климата) значения $K_{\text{в}}$ могут быть больше 350 (водообмен 1 раз в сутки), а в аридном климате не превышать 0,02-0,03 (один раз в 30-50 лет).

Коэффициент водообмена оз. Ньяса по данным за 1954-1979 гг. (см. таблица 2.1) оценивается как 0,0085, то есть водообмен замедленный.

По интенсивности внешнего водообмена (a_b) [Б.Б. Богословский, 1970], оцененного по формуле

$$a_b = \frac{W_{ст.}}{W_{оз.}}, \quad (2.2)$$

озёра можно разделить на четыре группы:

- 1) транзитные ($a_b = 50-300$ и более);
- 2) транзитно-аккумулятивные ($a_b = 1-50$);
- 3) аккумулятивно-транзитные (a_b менее 1);
- 4) аккумулятивно-бессточные озера.

Значение коэффициента внешнего водообмена оз. Ньаса равно 0,0015, следовательно, оно, как и многие крупные сточные озера с малым и исключительно малым водообменом (Ладожское, Онежское, Байкал, Севан, Иссык-Куль, Каспий) является аккумулятивным.

Указанные особенности находят отражение в характере изменения уровней оз. Ньаса.

2.4 Уровенный режим озера Ньаса в прошлом и настоящем: результаты ранее выполненных исследований

Уровни воды в водоемах отражают их водные ресурсы и изменяются во времени, формируя их уровенный режим.

Уровенный режим озер определяется комплексом следующих природных условий:

- соотношением между приходной (осадки на зеркало озера, поверхностный приток, подземный приток) и расходной частью водного баланса озера (испарение, поверхностный и подземный сток из озера);
- морфометрическими характеристиками озерной котловины (соотношение между высотой стояния воды в озере и площадью его водного зеркала);

– размерами озера, его формой, характером берегов, характером ветровой деятельности, определяющим размеры волн, сгонов и нагонов уровня.

Формирование уровня режима связано с изменчивостью составляющих водного баланса, как в годовом, так и в многолетнем разрезе. Поэтому в одной и той же климатической зоне на разных озерах различны амплитуды колебаний, интенсивность и продолжительности подъема и спада уровней, а также время наступления максимумов и минимумов. При этом максимальный уровень водоема, как правило, не совпадает с моментом наибольшего притока воды в озеро, а наблюдается в момент равенства прихода воды в озеро расходу из него.

Колебание уровня озера может быть кратковременным, сезонным, годовым, многолетним, вековым. Внутригодовые флуктуации уровня определяются структурой водного баланса.

Колебания уровня озёр по генезису делятся в основном на два вида:

- *динамические колебания уровней (деформационные)* возникают под воздействием атмосферных и космических сил (ветер, давление атмосферы, притяжение Луны, Солнца и т. д.), и объем воды в водоемах не меняется.
- *статические колебания уровня (воднобалансовые)* связаны с приходом и расходом воды, с изменением её плотности при изменении температуры и солености, т.е. колебания уровня сопровождаются изменением объема воды водоема [Догановский, 2012].

В Африке старше Ньяса только Танганьика. Несколько миллионов лет назад озеро занимало только северную часть своего водосбора и находилось на значительно большей высоте над уровнем моря. В результате понижения рельефа и углубления рифтовой впадины, водная масса сместилась на юг, поглотив реки на западе и бывший исток р. Шире. Уровень сначала был выше, но в результате многолетних изменений установился на современных отметках (рисунки 2.4 и 2.5) [Johnson and Odata, 1996].



Рисунок 2.4 Отметка высокого уровня на скале, находящейся на 1 м выше уровня озера. Конец сухого сезона, близ Укенью (ноябрь, 1992)



Рисунок 2.5 Остатки стволов погибших деревьев, близ Манда (октябрь, 1993)

Самые значительные изменения уровня Ньяса, как и всех восточных Африканских озёр, наблюдались в позднем плейстоцене. Значительная рецессия наблюдалась до 25 000 гг. до н.э., и тогда уровень был ниже современного на 250-500 м., как показано по результатам сейсмических исследований, [Scholz and Rosendahl, 1988 г.]. Кроме того, в это время климат был сухой. Так же есть данные о второй значительной рецессии [Owen et al., 1990 г.]. Есть данные о значительных изменениях уровня в 1150, 1250 и между 1500 и 1850 гг. н.э. Эти события носили климатический характер, так как существенных тектонических подвижек в это время не наблюдалось. За рецессией 1500-1850 гг. последовал цикл заполнения озера [Crossley et al. 1984 г.].

Уровень озера до некоторой степени зарегулирован вытекающей из него р. Шире, на которой расположено несколько плотин. На протяжении первых 20 км после выхода из озера, до оз. Маломбо Шире имеет очень незначительный уклон. Затем её уклоны увеличиваются, падение на участке длиной 80 км составляет 280 м., в русле наблюдаются многочисленные пороги (Murchinson Rapids). В нижнем течении уклоны небольшие, река имеет широкую заболоченную пойму (Болото Слонов), 500 км² которой регулярно затопливается. Площадь затопления в сезон дождей может достигать 1 000 км².

Высокая изменчивость осадков в сезон дождей приводит к межгодовым изменениям уровня озера (рисунок 2.6). Данные об уровнях озера доступны с 1894 г. За период 1865-1894 гг. есть данные, полученные во время первой исследовательской экспедиции Левингстона и европейских миссионеров, [Pike and Rimmington, 1965 г.]. Эти данные показывают, что межгодовые изменения уровня Ньяса не всегда синхронно изменениям уровней соседних Великих озёр, и позволяют утверждать о наличии, помимо климатических, иных причин колебаний уровня.

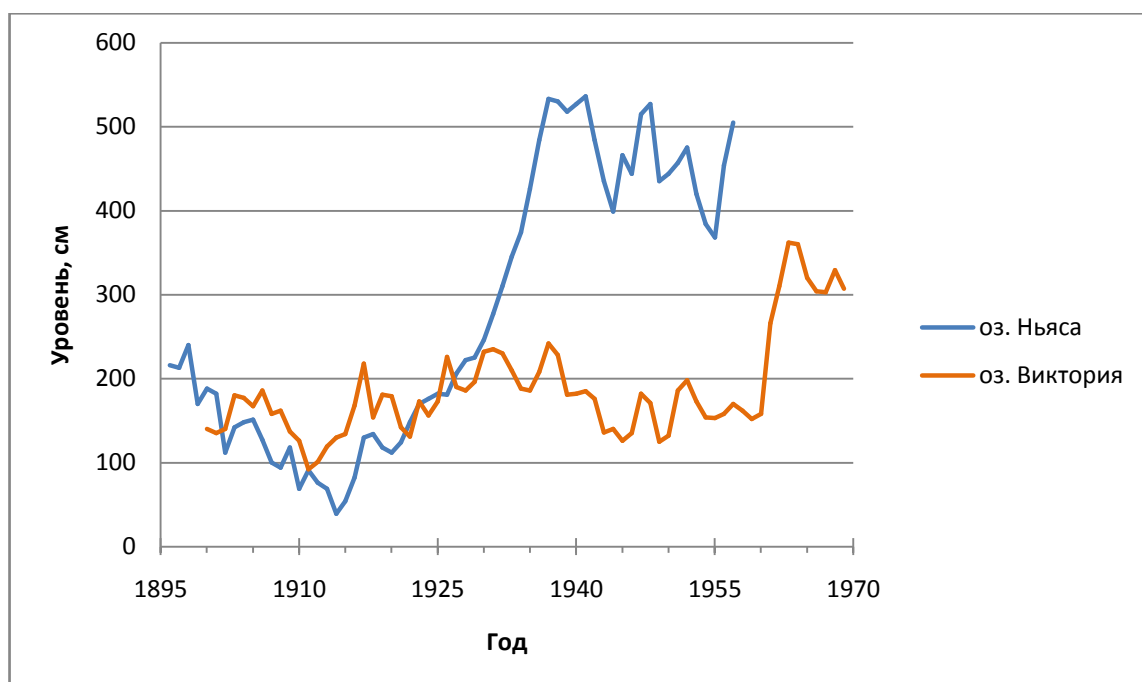


Рисунок 2.6 Временной ход среднегодовых значений уровня оз. Виктория и оз. Ньяса

Амплитуда многолетних колебаний за 100-летний период наблюдений составила около 8 м. Катастрофически высокие уровни наблюдались на озере в 1979-1980 гг., а низкие – в начале XX в. К 1915 г. из-за сильного падения уровня отток из озера прекратился, и для его восстановления потребовалось около 20 лет [Dryton 1984, Kidd et al., 1999].

В 1970-е годы оз. Ньяса претерпело серию существенных повышений уровня, которая завершилась в мае 1980 г. рекордно высоким уровнем 475,8 м н.у.м. Хотя затем уровни немного понизились, средний уровень в 1990-е годы по-прежнему был на 1 м выше, чем все ранее наблюденные, и, вероятно, это были максимальные уровни за более чем 150 лет.

Помимо межгодовых изменений уровня наблюдаются и внутригодовые колебания, которые вызваны сезонностью выпадения осадков. В течение года минимальный уровень, как правило, отмечается в конце ноября. В течение дождливого сезона – с ноября по апрель – уровень озера повышается. Внутригодовая амплитуда уровня изменялась от 0,25 м (1948-1949 гг.) до

1,83 в (1978-1979 гг.), при средней амплитуде за год около 1 м. [Rite, 1981 г.; Eccles, 1984 г.].

Высокие уровни вызывают социальные и экономические проблемы в прибрежных районах Малави, Мозамбика и Танзании: затапливаются низменные районы и частично разрушаются коммуникации и системы водоотведения и водоснабжения. Прибрежные районы обладают большим потенциалом для развития сельского хозяйства, рыболовства и туризма. Кроме того, сток из озера по р. Шире обеспечивает выработку гидроэлектроэнергии и ирригацию ниже по течению. Таким образом, чрезвычайно важно понимать причины изменений уровня.

Ранние попытки понять гидрологию озера (Delvaux, 1924; Kanthack, 1941) осложнялись недостатком данных, но к 1957 г. Cochrane смог собрать значительный объём гидрологической и климатической информации. Он признал, что озеро ведет себя «загадочно и разрушительно», и полностью объяснял это явлениями природы. Он отмечал, что незначительное количество воды, вытекающее из озера или аккумулируемое в нём, определяется соотношением осадков и испарения. Так как эти элементы изменяются, то и уровень озера существенно колеблется.

Cochrane дал рекомендации по его стабилизации. Страх перед повторением периода без стока из озера подтолкнул власти последовать данным рекомендациям. В 1956 г. через р. Шире была построено специальное сооружение, чтобы поднять уровень озера, но она была вновь открыт в следующем году.

Гидрология озера получила надёжную основу в работах Пайка (1964), хорошо понявшего его тонкую природу. Основой для дальнейшей работы стал водный баланс озера. Наиболее важный вывод заключался в том, что уровни озера значительно зависят от поступления грунтовых вод, и поэтому повышаются даже если количество осадков не увеличивается. Во время исследований Пайка было предложено несколько крупных проектов развития долины р Шире. В 1965 г. для стабилизации уровня озера на реке возвели

плотину, что обеспечило гарантированный поток воды из озера для реализации проектов по выработке гидроэлектроэнергии и ирригации. В связи со строительством плотины в следующие два десятилетия на озере сохранялись высокие уровни воды, которые по расчетам Dryton (1984) на 20-40 см превышали естественные. В 1997 г. уровень озера снова снизился до значений, угрожающих оттоку, но, уже со следующего года, начал расти.

В 1976 г. эксперты Всемирной метеорологической организации (ВМО), работающие совместно с малавийскими гидрологами, подготовила *Оценку Водных ресурсов озера* (ВМО, 1976 г.), обобщив гидрологические данные до настоящего времени, и внесли предложения по управлению ресурсами. Хотя в докладе основное внимание уделялось управлению плотинами, чтобы предотвратить возврат к низким уровням озера, он также рассматривал вероятность наводнений и рекомендовал, чтобы в будущем сооружения проектировались с тем, чтобы выдерживать статические уровни воды до 474,8 м н.у.м. Было также отмечено, что на водотоках водосбора Ньяса участились быстроразвивающиеся паводки, предположительно, в результате изменения сельскохозяйственной практики, но статистически значимого тренда на увеличение стока не наблюдалось.

После экстраординарного повышения уровня озера в 1979 г. Drayton выполнил статистический анализ уровня озера и рекомендовал «безопасный» статический уровень 477,6 м н.у.м. в течение следующих 30 лет.

Однако в этом исследовании было признано, что чисто статистические результаты, по всей видимости, существенно зависят от того факта, что, по крайней мере, половина наблюдений включала низкие уровни озера и также то, что чисто статистический подход не позволяет объяснить причины таких изменений.

Поэтому был предложен альтернативный подход (воднобалансовый), который должен был помочь найти основную причину колебаний уровня озера. К сожалению, взаимосвязи между компонентами водного баланса оказались слишком сложными, и качество данных было не высоким, что не

позволило непосредственно применить такой подход. Каждый процесс рассматривался поочередно и, при необходимости, разрабатывалась его простая численная модель на основе водного баланса. Задавались изменения значений отдельных компонентов баланса, а модели имитировали соответствующие изменения уровне озера. Результаты показали, что общий подъем уровня озера и его быстрое повышение за период до 1990 г. могут быть объяснены колебаниями осадков.

Также анализировались изменения в распределении стока в течение года. Было обнаружено, что они не приводят к долгопериодным изменениям, а влияют только на внутригодовые колебания уровня. С другой стороны, было показано, что небольшое увеличение стока приводит к значительному увеличению среднего уровня озера, но к тому времени не было статистически значимых изменений стока с водосбора [Johnson and Odata, 1996].

В отличие от многих озер Африканского Рифта оз. Ньяса в последнее десятилетие демонстрирует тренд повышения уровня.

Для достижения цели исследования – выявления закономерностей и особенностей уровня оз. Ньяса – использованы следующие данные:

– среднемесячные значения температура воздуха и осадков 1961- 2000 гг. по метеорологическим станциям Шилека (767 м н.у.м.), Лишинга (1365 м н.у.м.) и Мзузу (1254 м н.у.м.) (рисунок 3.1);

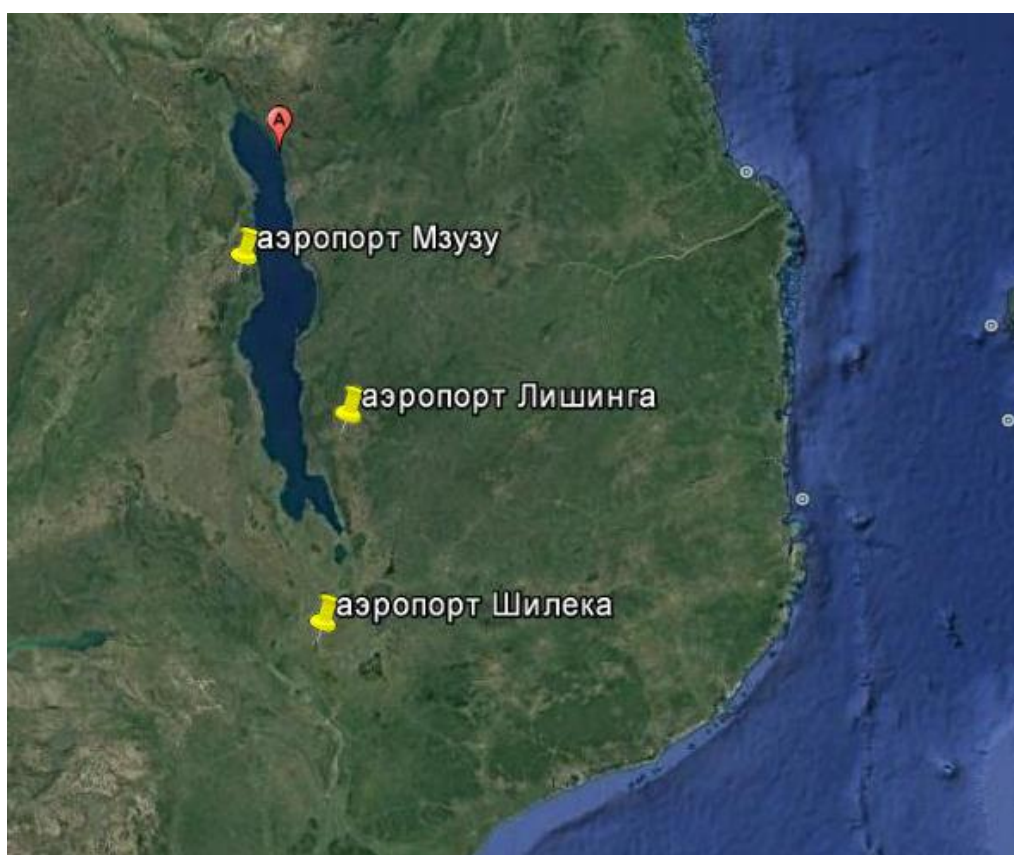


Рисунок 3.1 Схема расположения метеостанций

– значения уровня воды оз. Ньяса, 1896-1992 гг., по данным Dryton (1984) (значения наблюдаемых ежедневных уровней осреднены за период один месяц и относятся к отметке долины Шире, который примерно равен среднему уровню моря) и данные спутниковой альтиметрии за 1993-2016 гг. по Тореx/Poseidon и Jason (таблица 1 Приложения А).

3.1 Статистический анализ

Проверка однородности рядов гидрометеорологических элементов

Все гидрометеорологические процессы обусловлены совместным влиянием многочисленных разнообразных геофизических процессов, физико-географических условий и, в последнее время, антропогенных факторов. Таким образом, эти процессы зависят от множества причин, поэтому их изменение во времени следует рассматривать как случайное.

Если в качестве математической модели для описания статистической структуры выборок из рядов гидрометеорологических элементов рассматривать случайную величину, то статистические характеристики выборки не должны изменяться, т. е. все ее элементы должны относиться к одной генеральной совокупности. Если условия формирования рядов изменяются, то это приведет к изменению статистических характеристик выборки, например, среднего значения или дисперсии.

По критериям Стьюдента и Фишера были проверены на однородность (при уровне значимости $2\alpha=10\%$) ряды среднегодовых значений температуры воздуха и осадков по станциям Шилека (1961-2000), Лишинга (1961-2000) и Мзузу (1963-1999). А также ряд значений уровня воды оз. Ньяса (1933-2016).

Для проверки значимости различия средних значений двух выборок используем критерий Стьюдента. Предположим, что две выборки относятся к одной генеральной совокупности, тогда различие средних значений двух выборок и среднего квадратического отклонения (СКО) должно быть статистически незначимым. На основе этой разности построим статистику.

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{\sigma_{\bar{x} - \bar{y}}}, \quad (3.1)$$

где $\bar{x}$ – среднее значение из выборки длиной m ,
 $\bar{y}$ – среднее значения из выборки длиной n ,
 $\sigma_{\bar{x} - \bar{y}}$ – СКО разности $(\bar{x} - \bar{y})$;

$$\sigma_{\bar{x} - \bar{y}} = S \sqrt{\frac{(m-n)}{mn}}, \quad (3.2)$$

где S – эмпирическая оценка σ ;

Значение S определяется в зависимости от выборочных значений S_x и S_y .

$$S = \sqrt{\frac{(m-1)S_x^2 + (n-1)S_y^2}{m+n-2}}, \quad (3.3)$$

В окончательном виде выражение для статистики t имеет вид:

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{S} \sqrt{\frac{mn}{m+n}}, \quad (3.4)$$

Критическое значение $t_{кр}$ определяется по стандартным таблицам. Расхождение между статистическими характеристиками можно считать незначимым, если выборочное значение статистики t не превышает значения $t_{кр}$.

Критерий Фишера используется для проверки значимости различия дисперсий двух выборок. Исходный ряд делится на две части, затем оцениваются дисперсии для каждой из частей ряда и вычисляется эмпирическое значение статистики Фишера $F = S_x^2 / S_y^2$, где $S_x^2 > S_y^2$. Полученное значение F сравниваем с табличным значением $F_{кр}$. Если при принятом уровне значимости оказывается, что $F < F_{кр}$, то расхождение дисперсий считается незначимым и ряд считается однородным по дисперсии [Дружинин и Сикан, 2001 г.].

Среднегодовые значения уровня воды

Результаты проверки ряда значений уровня воды озера на однородность по среднему и дисперсии представлены в таблицах в Приложении.

Для уровни оз. Ньяса получаем $|t^*| = 5,50 > t_T = 1,99$, гипотеза об однородности ряда по критерию Стьюдента при уровне значимости $2\alpha = 10\%$ опровергается.

Для оз. Ньяса получаем $|F^*| = 0,54 < F_T = 0,59$, гипотеза об однородности ряда по критерию Фишера при уровне значимости $2\alpha=10\%$ не опровергается.

Среднегодовые значения температуры воздуха

Результаты проверка ряда значений среднегодовых температур воздуха (ст. Лишинга) на однородность по среднему и дисперсии представлены в Приложении

Для ст. Лишинга получаем $|t^*| = 2,17 > t_T = 2,03$, гипотеза об однородности ряда по критерию Стьюдента при уровне значимости $2\alpha=10\%$ опровергается.

Для ст. Лишинга получаем $|F^*| = 2,411 > F_T = 2,203$, гипотеза об однородности ряда по критерию Фишера при уровне значимости $2\alpha=10\%$ опровергается.

Результаты проверка ряда значений среднегодовых температур воздуха (ст. Мзузу) на однородность по среднему и дисперсии представлены в Приложении

Для ст. Мзузу получаем $|t^*| = 4,261 > t_T = 2,059$, гипотеза об однородности ряда по критерию Стьюдента при уровне значимости $2\alpha=10\%$ опровергается.

Для ст. Мзузу получаем $|F^*| = 0,208 < F_T = 0,451$, гипотеза об однородности ряда по критерию Фишера при уровне значимости $2\alpha=10\%$ не опровергается.

Результаты проверка ряда значений среднегодовых температур воздуха (ст. Шилека) на однородность по среднему и дисперсии представлены в Приложении

Для ст. Шилека получаем $|t^*| = 2,85 > t_T = 2,048$, гипотеза об однородности ряда по критерию Стьюдента при уровне значимости $2\alpha=10\%$ опровергается.

Для ст. Шилека получаем $|F^*| = 0,25 < F_T = 0,461$, гипотеза об однородности ряда по критерию Фишера при уровне значимости $2\alpha=10\%$ не опровергается.

Среднегодовые значения сумм осадков

Результаты проверка ряда значений среднегодовых значений сумм осадков (ст. Лишинга) на однородность по среднему и дисперсии представлены в Приложении.

Для ст. Лишинга получаем $|t^*| = 1,370 > t_T = 2,03$, гипотеза об однородности ряда по критерию Стьюдента при уровне значимости $2\alpha=10\%$ опровергается.

Для ст. Лишинга получаем $|F^*| = 1,786 < F_T = 2,168$, гипотеза об однородности ряда по критерию Фишера при уровне значимости $2\alpha=10\%$ не опровергается.

Результаты проверка ряда значений среднегодовых значений сумм осадков (ст. Мзузу) на однородность по среднему и дисперсии представлены в Приложении.

Для ст. Мзузу получаем $|t^*| = 1,140 < t_T = 2,059$, гипотеза об однородности ряда по критерию Стьюдента при уровне значимости $2\alpha=10\%$ не опровергается.

Для ст. Мзузу получаем $|F^*| = 0,207 < F_T = 0,451$, гипотеза об однородности ряда по критерию Фишера при уровне значимости $2\alpha=10\%$ не опровергается.

Результаты проверка ряда значений среднегодовых значений сумм осадков (ст. Шилека) на однородность по среднему и дисперсии представлены в Приложении.

Для ст. Шилека получаем $|t^*| = 0,0707 < t_T = 2,0281$, гипотеза об однородности ряда по критерию Стьюдента при уровне значимости $2\alpha=10\%$ не опровергается.

Для ст. Шилека получаем $|F^*| = 0,611 > F_T = 0,461$, гипотеза об однородности ряда по критерию Фишера при уровне значимости $2\alpha=10\%$ опровергается.

Результаты проверки рядов гидрометеорологических элементов на однородность приведены в Приложении. Оценка однородности рядов представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Результаты проверки однородности рядов
гидрометеорологических элементов

	Мзузу		Шилека		Лишинга	
	Критерий Стьюдента	Критерий Фишера	Критерий Стьюдента	Критерий Фишера	Критерий Стьюдента	Критерий Фишера
Температура воздуха	–	+	–	+	–	–
Осадки	+	+	+	–	–	+
Уровень воды оз. Ньяса	Критерий Стьюдента		Критерий Фишера			
	–		+			

3.2 Квантильный анализ и фильтрация Баттерворта

Многолетняя изменчивость гидрометеорологических характеристик традиционно анализируется по рядам средних годовых и экстремальных значений. Средние годовые значения используются для характеристики нормы и ее изменчивости. Причём, для получения достаточно надежной нормы следует выбирать период наблюдений, включающий одинаковое количество лет с повышенными и пониженными значениями. Для анализа многолетней изменчивости климатических условий выполнен квантильный анализ как отдельных гидрометеорологических элементов, так и

комплексной характеристики увлажненности бассейна оз. Ньяса – индекса Де Мартона.

Квантильный анализ заключается в нахождение квантилей $X_{\min}$, $X_{0,25}$, $X_{0,5}$, $X_{0,75}$ и $X_{\max}$ распределения $F(x)$ значений выборки. Алгоритмы оценивания перечисленных характеристик следующие:

$X_{\min}$, $X_{\max}$ – крайние члены ранжированного (выстроенного в порядке возрастания или убывания) ряда;

$X_{0,5}$ – медиана, которая при неизвестном законе распределения вычисляется по формулам:

$$X_{0,5} = \begin{cases} x(n+1)/2, & \text{если } n - \text{нечетное} \\ 0,5(X_{n/2} + X_{n/2+1}), & \text{если } n - \text{четно} \end{cases}, \quad (3.5)$$

$X_{0,75}$, $X_{0,25}$ – медианы соответствующих половин ранжированного ряда.

Анализ крайних членов $X_{\min}$ и $X_{\max}$ требует чрезвычайной осторожности. Значительный большей устойчивостью обладает размах $R = X_{\max} - X_{\min}$, характеризующий ширину выборочного распределения данных.

Медиана $X_{0,5}$, являясь средним членом ранжированного ряда, характеризует центр распределения данных в выборке. Набор квантилей, $X_{0,25}$, $X_{0,5}$, $X_{0,75}$ фиксирует «норму» изменчивости анализируемого параметра, $X_{0,25}$ – нижний, а $X_{0,75}$ – верхний ее пределы.

$$Q = X_{0,75} - X_{0,25}, \quad (3.6)$$

где Q – интерквартильное расстояние, служит мерой разброса в пределах «нормы».

Значения анализируемого параметра, выходящие за квартили $X_{0,25}$, $X_{0,75}$, можно рассматривать как особые значения, выходящие за верхний и нижний внутренние барьеры, вычисляемые по формулам:

$$\begin{cases} X_{\text{в}} = X_{0,75} + 1,5Q & (\text{верхний}) \\ X_{\text{н}} = X_{0,25} - 1,5Q & (\text{нижний}) \end{cases}, \quad (3.7)$$

где $X_{\text{в}}$ и $X_{\text{н}}$ – экстремальные значения.

В качестве оценки центра распределения данных в выборке можно рассматривать математическое ожидание m и трехсреднее значение T^* , а в качестве оценок масштаба распределения – дисперсию D или стандарт σ .

Оценки математического ожидания и дисперсии обычно вычисляются как среднее арифметическое значение и квадрат отклонений от него, трехсреднее значение – по известной формуле Тьюки:

$$T^* = 0,25(X_{0,25} + 2X_{0,5} + X_{0,75}), \quad (3.8)$$

Сопоставление среднего m с медианой $X_{0,5}$ и стандарта σ с интерквартильным расстоянием $0,74Q$ дает возможность получить предварительную информацию о типе и параметрах распределения данных в выборке. При симметричном распределении среднее и медиана равны с точностью до выборочной изменчивости. Чем асимметричнее распределение, тем больше отклоняется среднее от медианы.

Сопоставление оценок среднего и медианы, стандарта и интерквартильного расстояния удобно проводить графически. Для этого на график наносят точки абсциссы которых соответствуют среднему или стандарту, а ординаты – медиане или интерквартильному расстоянию. Если точки группируются около биссектрисы координатного угла, можно считать, что соотношение Q к σ и $X_{0,5}$ к m такое же, как у нормального распределения выборки.

В качестве другой характеристики асимметрии полезно использовать доверительный интервал:

$$A_s = [(X_{0,75} - X_{0,5}) - (X_{0,5} - X_{0,25})]/2, \quad (3.9)$$

Расчеты доверительных интервалов A_s , вычисленные по смоделированным нормальным рядам показали, что выборку целесообразно считать симметричной, если $-0,31 < A_s < 0,25$, имеющей левую асимметрию, если $A_s < -0,31$ или правую при $A_s > 0,25$.

Одним из методов выделения тенденций или трендов на повышение или понижение временных рядов гидрометеорологических значений

считается фильтрация, которая бывает низкочастотной и высокочастотной, полосовой и режекторной.

Низкочастотная фильтрация представляет собой преобразование ряда, при котором исключаются высокочастотные составляющие. Для анализа многолетней изменчивости гидрометеорологических процессов применяют цифровую тангенсную низкочастотную фильтрацию рядов. Это связано с тем, что тангенсная фильтрация обладает такими преимуществами, как простота вычисления коэффициентов передаточной функции фильтра и большая крутизна ее амплитудно-частотной характеристики вблизи частоты среза.

Одной из основных характеристик фильтра является его передаточная функция $H(\omega)$, которая рассчитывается по формуле:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{\sum_{k=0}^K \beta_k Z^{-k}}{1 + \sum_{l=1}^L \alpha_l Z^{-1}}, \quad (3.10)$$

$$Z = \exp(i\omega\Delta), \quad (3.11)$$

где Δ – интервал дискретизации рядов $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$

$X(\omega)$ и $Y(\omega)$ – их Фурье-изображение.

Передаточная функция фильтра $H(\omega)$ выражает связь между частотными представлениями рядов $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$ и имеет значения в комплексной области, т.е. $H(\omega)$ можно представить в виде:

$$H(\omega) = |H(\omega)| \exp(-i\varphi(\omega)), \quad (3.12)$$

$$H(\omega) = \frac{(b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2})^{M_1}}{\prod_{m=1}^{M_1} (1 + a_{1m} Z^{-1} + a_{2m} Z^{-2})}, \quad (3.13)$$

где величина $M = 2M_1$ называется порядком передаточной функции или порядком фильтра.

При таком представлении функцию $|H(\omega)|$ называют амплитудно-частотной характеристикой фильтра. В каждой точке частотного диапазона она выражает отношение амплитуд гармоник отфильтрованного и неотфильтрованного ряда с данной частотой. Функцию $\varphi(\omega)$ называют фазово-частотной характеристикой фильтра. Она выражает зависимость

сдвига фаз от частоты в отфильтрованном и неотфильтрованном рядах. Тангесные цифровые фильтры Баттерворта имеют передаточную функцию $H(\omega)$, выраженную по формуле 3.13, что позволяет применять вышеуказанный метод фильтрации, обладающий:

- рекуррентным способом вычисления отфильтрованного ряда;
- возможностью повышения порядка фильтра увеличением числа уравнений.

Тангесный низкочастотный фильтр Баттерворта порядка M имеет амплитудно-частотную характеристику

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\operatorname{tg}(\omega \Delta/2)}{\operatorname{tg}(\omega_c \Delta/2)} \right]^{2M}}}. \quad (3.14)$$

где ω_c – частота среза.

При анализе временного ряда среднегодовых значений температуры воздуха по ст. Шилека (рисунок 3.2) определены квантили, имеющие значения: $X_{0,25} = +22,2$ °C; $X_{0,75} = +22,8$ °C. Определены выходящие за верхний и нижний внутренние барьеры квантили: $X_n = +21,2$ °C; $X_v = +24,0$ °C. Медиана составляет $X_{0,5} = +22,6$ °C.

Как видно, временной ход имеет исключительно сложный характер. В расчетном периоде наблюдаются резкие изменения значений температура воздуха. В целом, после 1980 г. Изменчивость характеристики возросла.

Максимальная среднегодовая температура воздуха (+23,9 °C) наблюдалась в 1992 г., а минимальная температура воздуха (+21,6 °C) наблюдалось в 1982 г. Таким образом, многолетняя амплитуда изменения среднегодовой температуры воздуха достигает 2,3 °C.

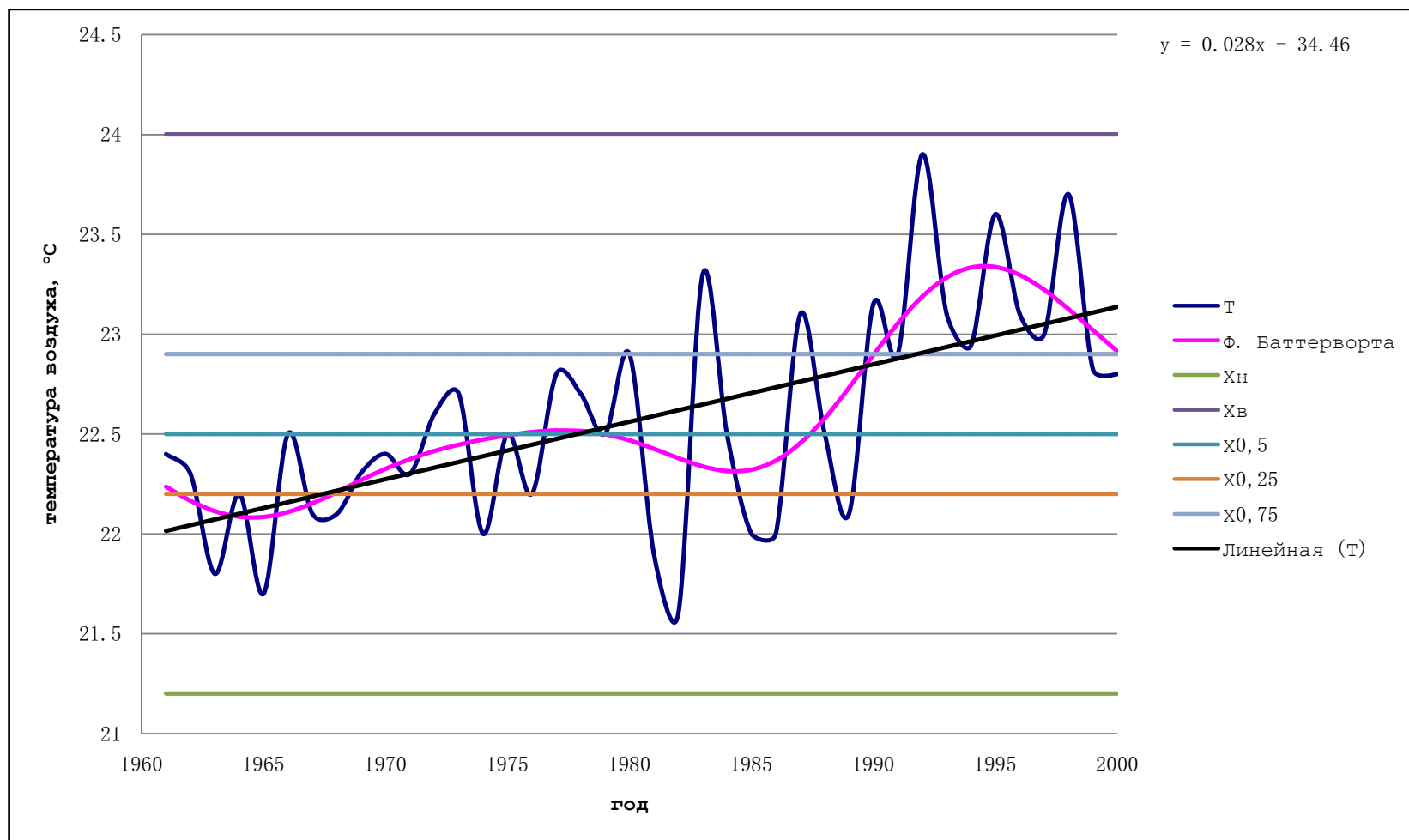


Рисунок 3.2 Временной ход среднегодовых значений температуры воздуха за период с 1961 по 2000 гг., ст. Шилека

На результатах фильтрации Баттерворта наблюдаются периоды локальной нестационарности, связанные с повышением и понижением среднегодовых значения температура воздуха.

Наблюдается положительный тренд, статистически значимый. Уравнение, описывающее выделенный тренд, приведено на рисунке 3.1. Тем не менее, на фоне общего положительного тренда период 1980-1990 гг. характеризуется пониженной температурой, а период после 1990 г – повышенной.

При анализе временного ряда среднегодовых значений температуры воздуха по ст. Лишинга (рисунок 3.3) определены квантили, имеющие значения: $X_{0,25} = +18,5$ °C; $X_{0,75} = +19,3$ °C. Определены выходящие за верхний и нижний внутренние барьеры квантили: $X_n = +17,3$ °C; $X_v = +20,5$ °C. Медиана составляет $X_{0,5} = +18,9$ °C.

Как видно, характер кривой изменяется во времени. В начале расчетного периода наблюдаются резкие повышения и понижения значений температура воздуха. Затем, после 1970 г., изменчивость намного ниже.

Максимальная температура воздуха (+19,8 °C) наблюдалась в 1998 г., а минимальная температура воздуха (+17,7 °C) наблюдалось в 1968 г. Таким образом, многолетняя амплитуда изменения температуры воздуха достигает 2,1 °C.

Наблюдается положительный тренд, статистически значимый. Уравнение, описывающее выделенный тренд, приведено на рисунке 3.3.

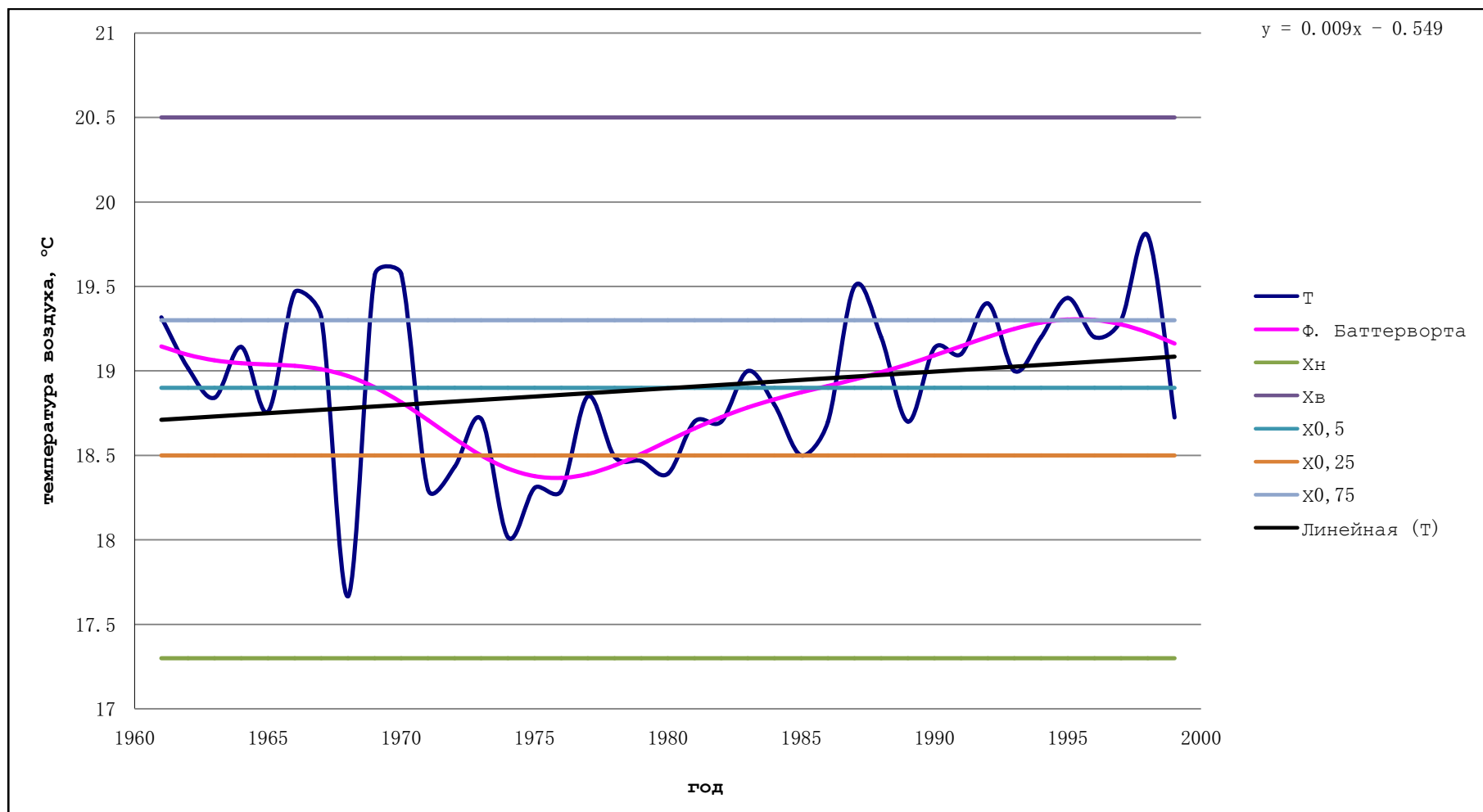


Рисунок 3.3 Временной ход среднегодовых значений температуры воздуха за период с 1961 по 1999 гг., ст. Лишинга

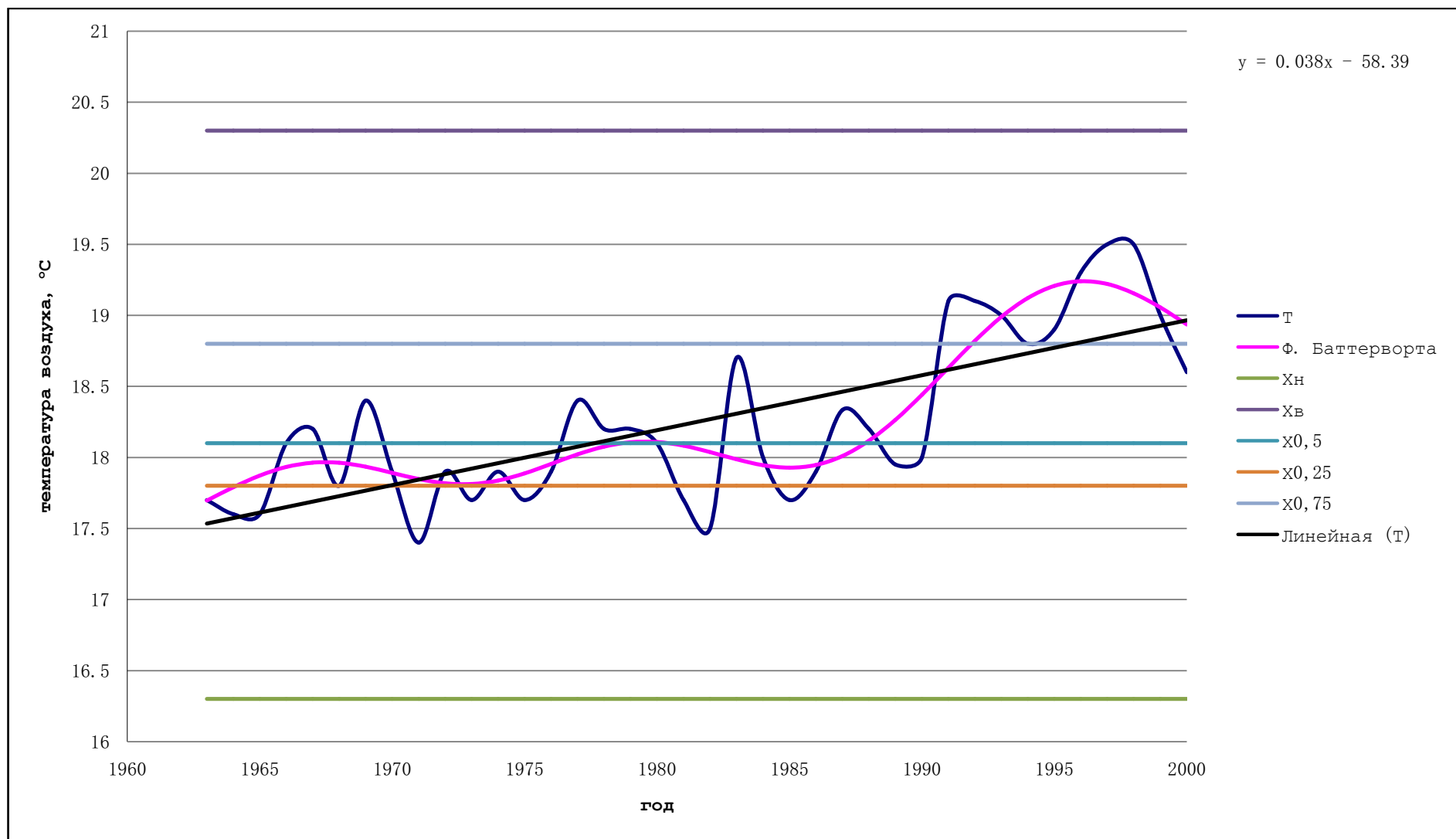


Рисунок 3.4 Временной ход среднегодовых значений температуры воздуха за период с 1963 по 2000 г., ст. Мзузу

При анализе временного ряда среднегодовых значений температуры воздуха по ст. Мзузу (рисунок 3.4) определены квантили, имеющие значения: $X_{0,25} = +17,8$ °C; $X_{0,75} = +18,8$ °C определены выходящие за верхний и нижний внутренние барьеры квантили: $X_n = +16,3$ °C; $X_v = +20,3$ °C. Медиана составляет $X_{0,5} = +18,1$ °C.

Обращает на себя внимание повышение температуры воздуха после 1985 г. Максимальная температура воздуха (+19,5 °C) наблюдалась в 1998 г., а минимальная температура воздуха (+17,4 °C) наблюдалось в 1971 г. Таким образом, многолетняя амплитуда изменения температуры воздуха составляет 2,1 °C.

На результатах фильтрации Баттерворта наблюдаются достаточно длительные квазистационарные периоды. Наблюдается положительный тренд, статистически значимый. Уравнение, описывающее выделенный тренд, приведено на рисунке 3.4.

Анализ многолетнего хода изменения температуры воздуха показал положительный значимый тренд на все трёх станциях. Однако на ст. Шилека среднегодовая температура воздуха выше, что может быть объяснено более низким её расположением: высота станции над уровнем моря 767 м. На ст. Лишинга температура воздуха ниже, чем на станциях Шилека и Мзузу, вероятно, в связи с её более высоким положением над уровнем моря (1365 м). Кроме того, она отделена от озера горной цепью.

Таким образом, для анализа гидрометеорологических процессов на оз. Ньяса можно рекомендовать станцию Мзузу, расположенную на северо-западном берегу озера.

На рисунке 3.5 представлен временной ход среднегодовых значений количества осадков на метеостанции Шилека. При анализе временного ряда определены:

– квантили, имеющие значения при $X_{0,25} = 728,3$ мм; $X_{0,75} = 1027,5$ мм.

Как видно, кривая имеет исключительно сложный характер. В период 1973-2000 гг. наблюдаются резкие повышения и понижения значений количества осадков.

– квантили, имеющие значения при $X_n = 279,5$ мм; $X_v = 1476,3$ мм.

Медиана составляет $X_{0,5} = 843,8$ мм.

Максимальное количество осадков (1383 мм) выпало в 1997 г., а минимальное количество осадков (482 мм) выпало в 1975 г. Таким образом, многолетняя амплитуда изменения количества осадков достигает 901 мм.

На результатах фильтрации Баттерворта наблюдаются периоды локальной нестационарности, связанные с повышением и понижением среднегодовых значений количества осадков.

Наблюдается незначительный положительный тренд, статистически не значимый. Уравнение, описывающее выделенный тренд, приведено на рисунке 3.5.

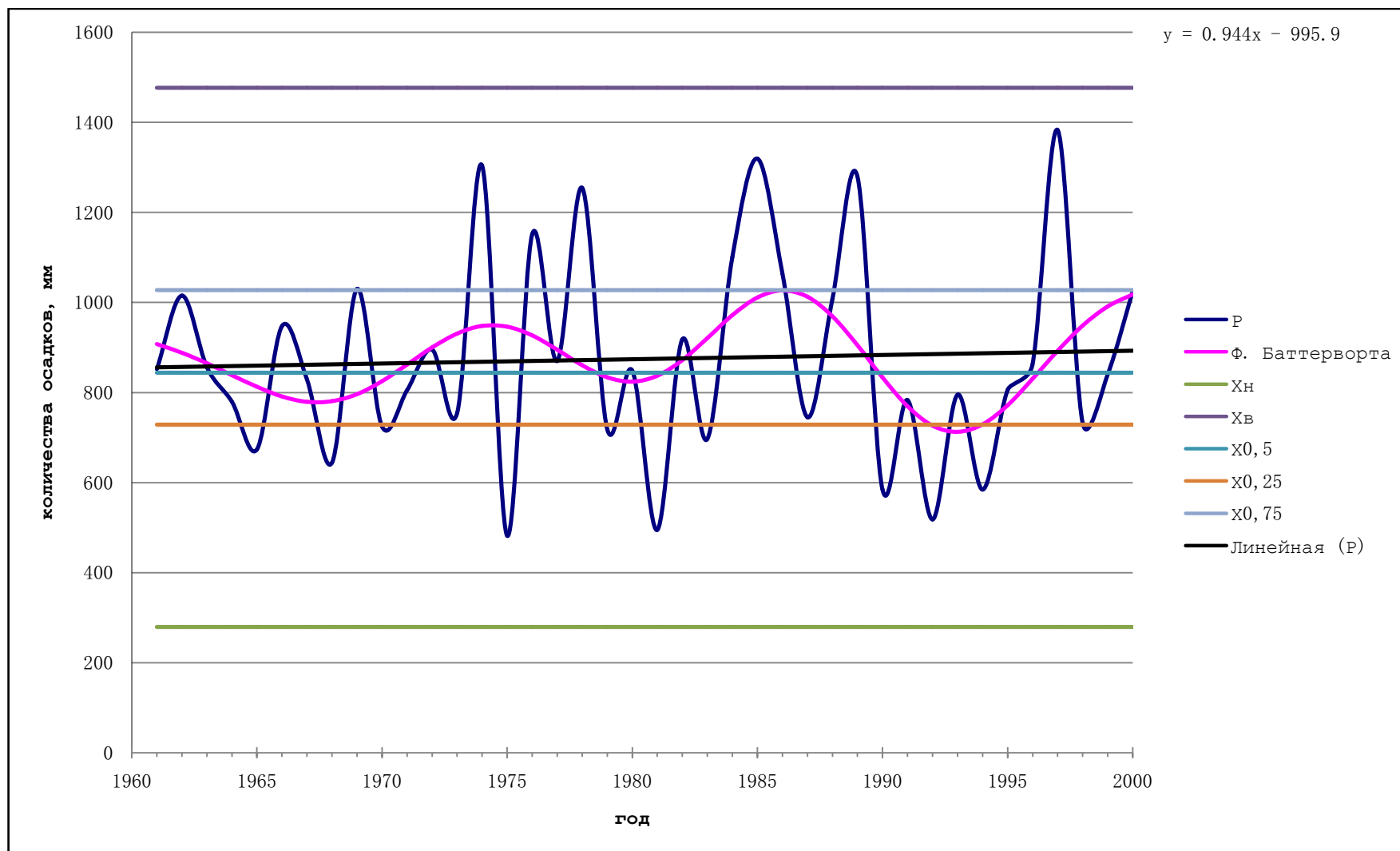


Рисунок 3.5 Временной ход среднегодовых сумм осадков за период с 1961 по 2000 гг., ст. Шилека

На рисунке 3.6 представлен временной ход среднегодовых значений количества осадков на метеостанции Лишинга. При анализе временного ряда определены:

- квантили имеющие значения при $X_{0,25} = 935,7$ мм; $X_{0,75} = 1031,3$ мм. Как видно, кривая имеет исключительно сложный характер. В течение всего расчетного периода наблюдаются резкие подъемы и спады значений количества осадков.
- квантили, имеющие значения при $X_H = 935,7$ мм; $X_B = 1\,659,2$ мм. Медиана составляет $X_{0,5} = 1131,3$ мм.

Максимальное количество осадков (2396 мм) выпадает в 1961 г., а минимальное количество осадков (695 мм) выпадает в 1994 г. Таким образом, годовая амплитуда изменения количества осадков достигает 1701 мм.

На результатах фильтрации Баттерворта наблюдаются периоды локальной нестационарности связанные с понижением и построениям среднегодовых значений количества осадков.

Наблюдается отрицательный тренд, статистически не значимый. Уравнение, описывающее выделенный тренд, приведено на рисунке 3.6.

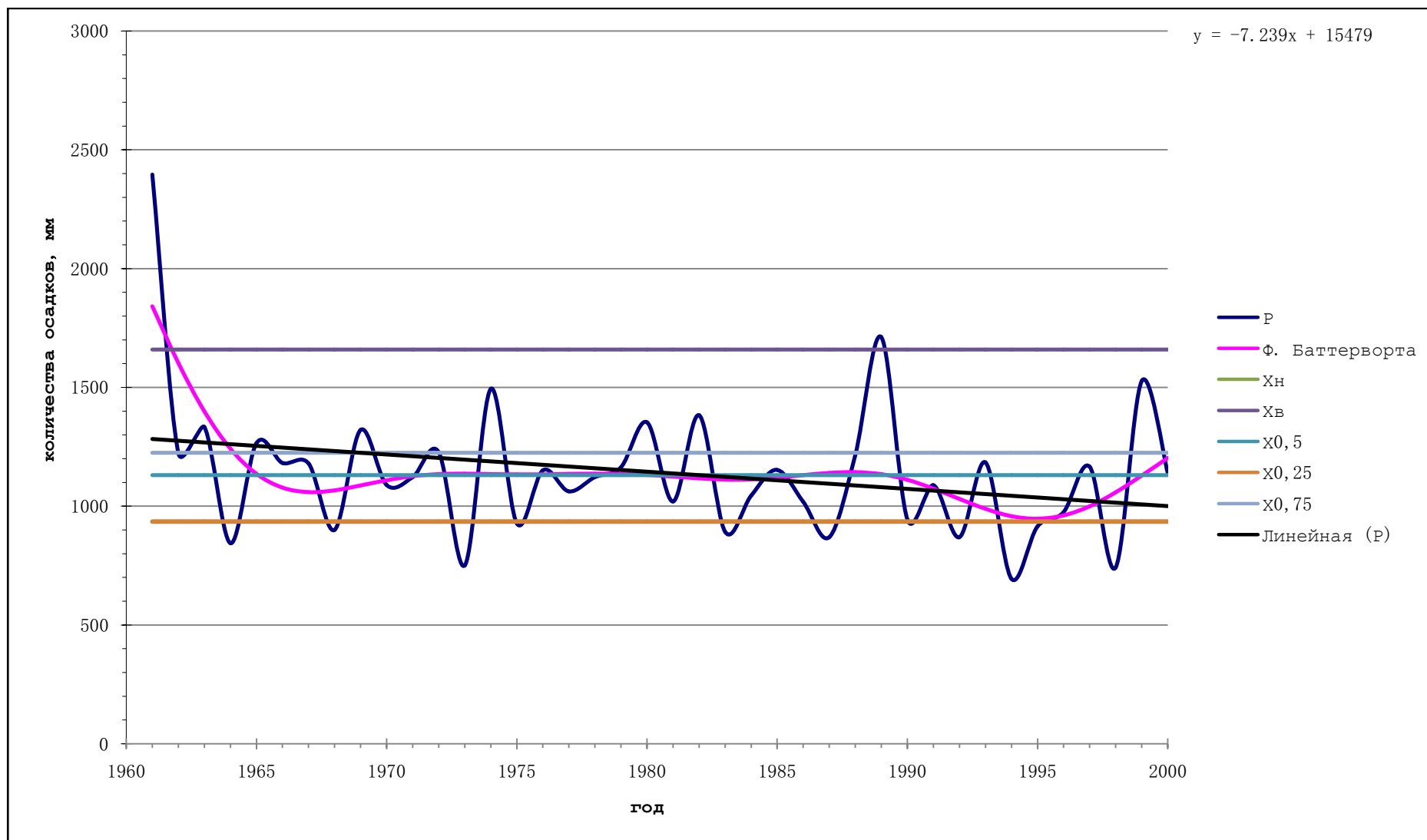


Рисунок 3.6 Временной ход среднегодовых сумм осадков за период с 1961 по 2000 гг., ст. Лишинга

На рисунке 3.7 представлен временной ход среднегодовых значений количества осадков на метеостанции Мзузу. При анализе временного ряда определены:

- квантили, имеющие значения при $X_{0,25} = 963$ мм; $X_{0,75} = 1354$ мм. Как видно, кривая имеет исключительно сложный характер. В течение всего расчетного периода наблюдаются резкие подъемы и спады значений количества осадков.

- квантили, имеющие значения при $X_n = 392,7$ мм; $X_v = 1960,7$ мм. Медиана составляет $X_{0,5} = 1229,5$ мм.

Максимальное количество осадков (1791,9 мм) выпало в 1999 г., а минимальное количество осадков (236,7 мм) выпало в 1982 г. Таким образом, многолетняя амплитуда изменения количества осадков достигает 1555,2 мм.

На результатах фильтрации Баттерворта наблюдаются периоды локальной нестационарности, связанные с повышением и понижением среднегодовых значений количества осадков.

Наблюдается заметный отрицательный тренд, но статистически не значимый. Уравнение, описывающее выделенный тренд, приведено на рисунке 3.7.

Анализ многолетнего хода количества осадков показал различную направленность и интенсивность их изменения. Так, на ст. Шилека значимое изменение количества осадков не наблюдается за год.

- на ст. Лишинга выпадает больше осадков, чем на ст. Шилека и наблюдается незначительное их снижение за расчётный период.

- на ст. Мзузу выпадает за год больше осадков, чем на других станциях и наблюдается их снижение за расчетный период.

Разница в абсолютных значениях годовых сумм осадков может быть объяснена различным высотным положением станций. Отрицательный тренд, вероятно, связан с мезомасштабными климатическими процессами в рассматриваемом регионе.

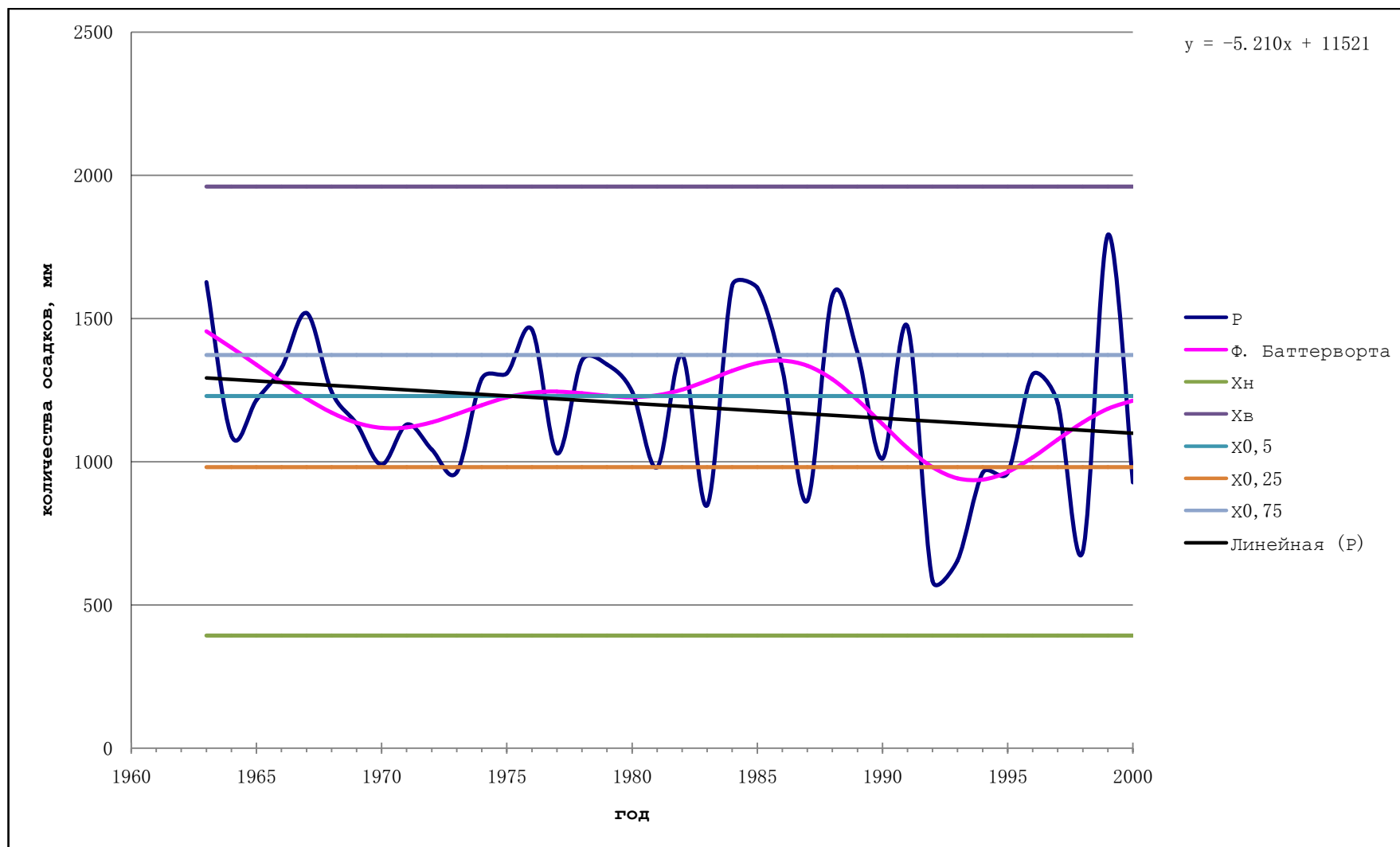


Рисунок 3.7 Временной ход среднегодовых сумм осадков за период с 1963 по 2000 гг., ст. Мзузу

3.3 Индекс Де-Мартона

Для описания состояния сложных природных систем, а также протекающих в ней процессов, часто вводятся различные интегральные показатели (индексы).

На качественном уровне степень увлажнения характеризуется понятиями сухость (аридность) и влажность (гумидность) климата той или иной территории. Для количественной характеристики степени увлажнения используются разнообразные показатели (индексы, коэффициенты) сухости или влажности климата.

Показатели сухости (влажности) климата прямо или косвенно отражают соотношение между средними за многолетний период (год, сезон, месяц) осадками (P , мм) или испаряемостью с открытой поверхности пресных вод или поверхности почвы (E_o , мм) (первая группа показателей), либо характеризуют отношение осадков к температуре воздуха (T , °C) (вторая группа показателей).

На основе данных о температуре воздуха и количестве осадков, измеренных на трёх выбранных метеостанциях, рассчитывался индекс Де-Мартона α , представляющий собой отношение годовой суммы осадков к среднегодовой температуре воздуха:

$$\alpha = \frac{\sum_{n=1}^{12} P_n}{T_n + 10}, \quad (3.15)$$

Индекс Де-Мартона достаточно наглядно характеризует гумидность и аридность климата.

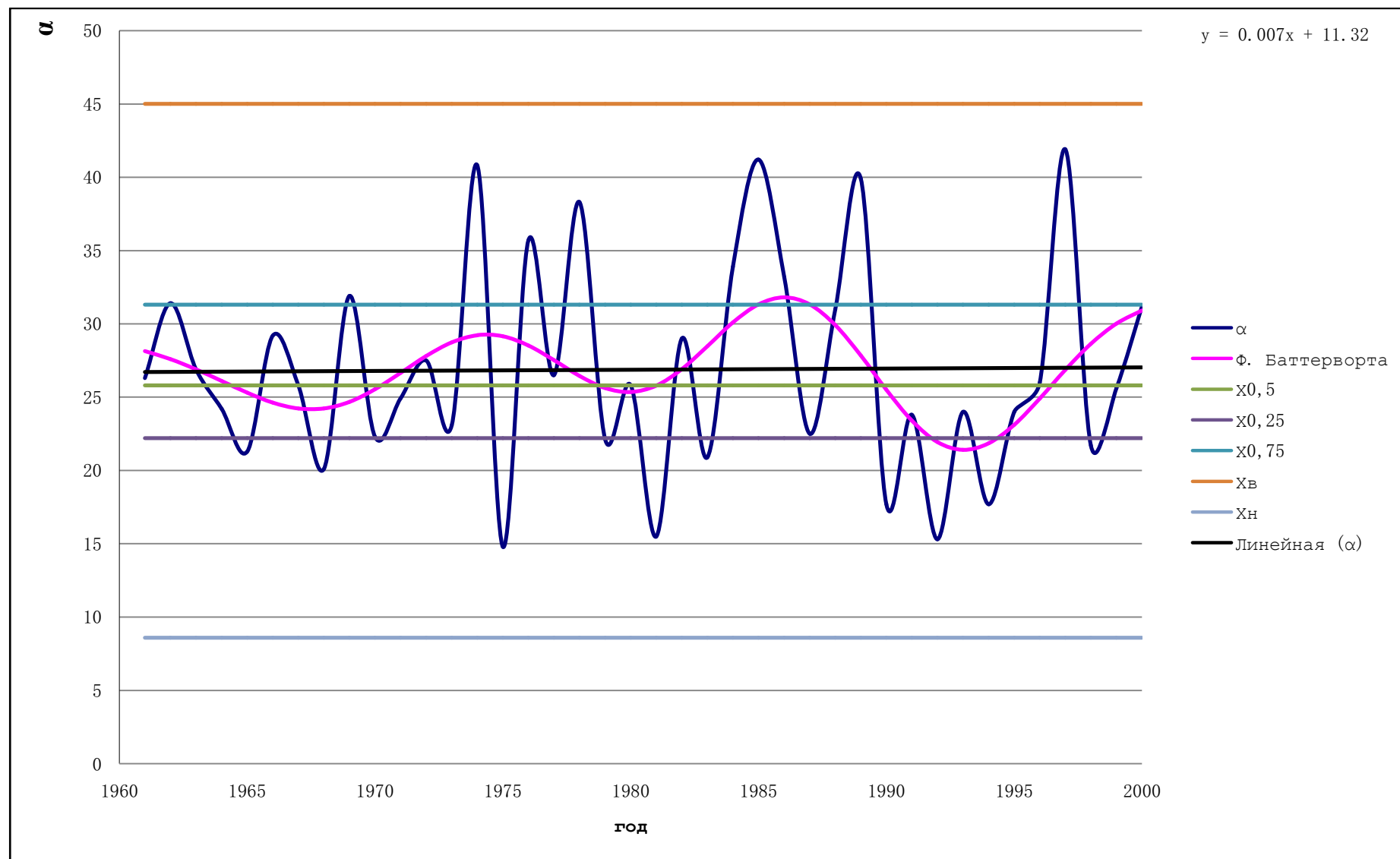


Рисунок 3.8 Временной ход индекса Де-Мартона, 1961-2000, ст. Шилека

При анализе временного ряда среднегодовых значений индекса Де-Мартона по ст. Шилека (рисунок 3.8) определены квантили, имеющие значения: $X_{0,25} = 22,2$; $X_{0,75} = 31,3$. Определены выходящие за верхний и нижний внутренние барьеры квантили: $X_n = 8,6$; $X_v = 45$. медиана составляет $X_{0,5} = 25,8$. Экстремальные значения индекса Де-Мартона за весь расчетный период не наблюдаются.

Годы недостаточного увлажнения (1975, 1981, 1990, 1992 гг. и другие) приведены в таблице 3.3. Они характеризуются значительным увеличением температуры воздуха и уменьшением количества осадков.

Годы обильного увлажнения (1974, 1978, 1985 гг. и другие) приведены в таблице 3.12. Они характеризуются увеличением количества осадков (1304, 1254 и 1319 мм) при наименьшей среднегодовой температуре воздуха за весь расчетный период (+22, 22.7 и +22 °С соответственно).

Можно выделить 7-8 летние циклы увлажнённости. Кроме этого необходимо отметить увеличение дисперсии ряда после 1972 г.

Тренд отсутствует. Это можно объяснить тем, что при значительном тренде на повышение температуры воздуха во временном ходе осадков тренда не наблюдается. В целом, характер увлажнённости территории в районе ст. Шилека не изменился.

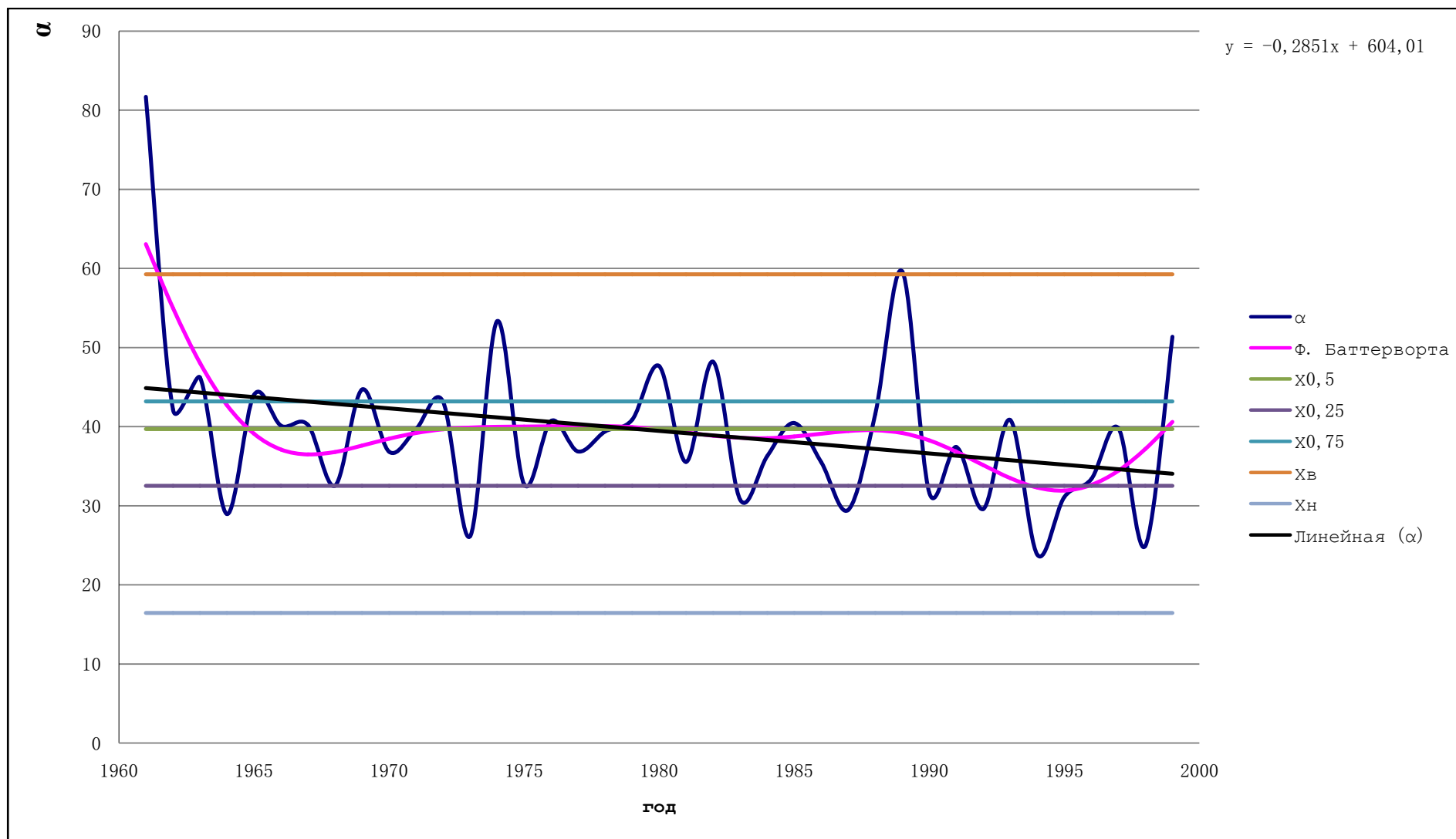


Рисунок 3.9 Временной ход индекса Де-Мартона, 1961-1999, ст. Лишинга.

При анализе временного ряда среднегодовых значений по ст. Лишинга (рисунок 3.9) определены квантили, имеющие значения: $X_{0,25}=32,5$; $X_{0,75}=43,2$. Определены выходящие за верхний и нижний внутренние барьеры квантили: $X_n = 16,5$; $X_v=59,3$. медиана составляет $X_{0,5}=39,7$.

Годы экстремально обильного увлажнения (1961 и 1989 гг.). Они характеризуются увеличением количества осадков (2396, 1711 мм) при наименьшей среднегодовой температуре воздуха за весь расчетный период (19.3, 18.7 °C).

Экстремально-недостаточное увлажнение за расчетный период не наблюдалось.

Годы недостаточного увлажнения (1973, 1994, 1998, гг. и другие) приведены в таблице 3.3. Они характеризуются резким увеличением температуры воздуха и уменьшением количества осадков.

Годы обильного увлажнения (1963, 1974, 1980, 1999, гг. и другие) приведены в таблице 3.2. Они характеризуются, в основном, выпадением значительного количества осадков при незначительной температуре воздуха.

Наличие в ряду экстремальных значений приводит к тому, что на результатах фильтрации Баттерворта наблюдаются периоды локальной нестационарности связанные с повышением и понижением значений индекса Де-Мартона.

Чётко выражен отрицательный значимый тренд. Уравнение, описывающее выделенный тренд, приведено на рисунке 3.9.

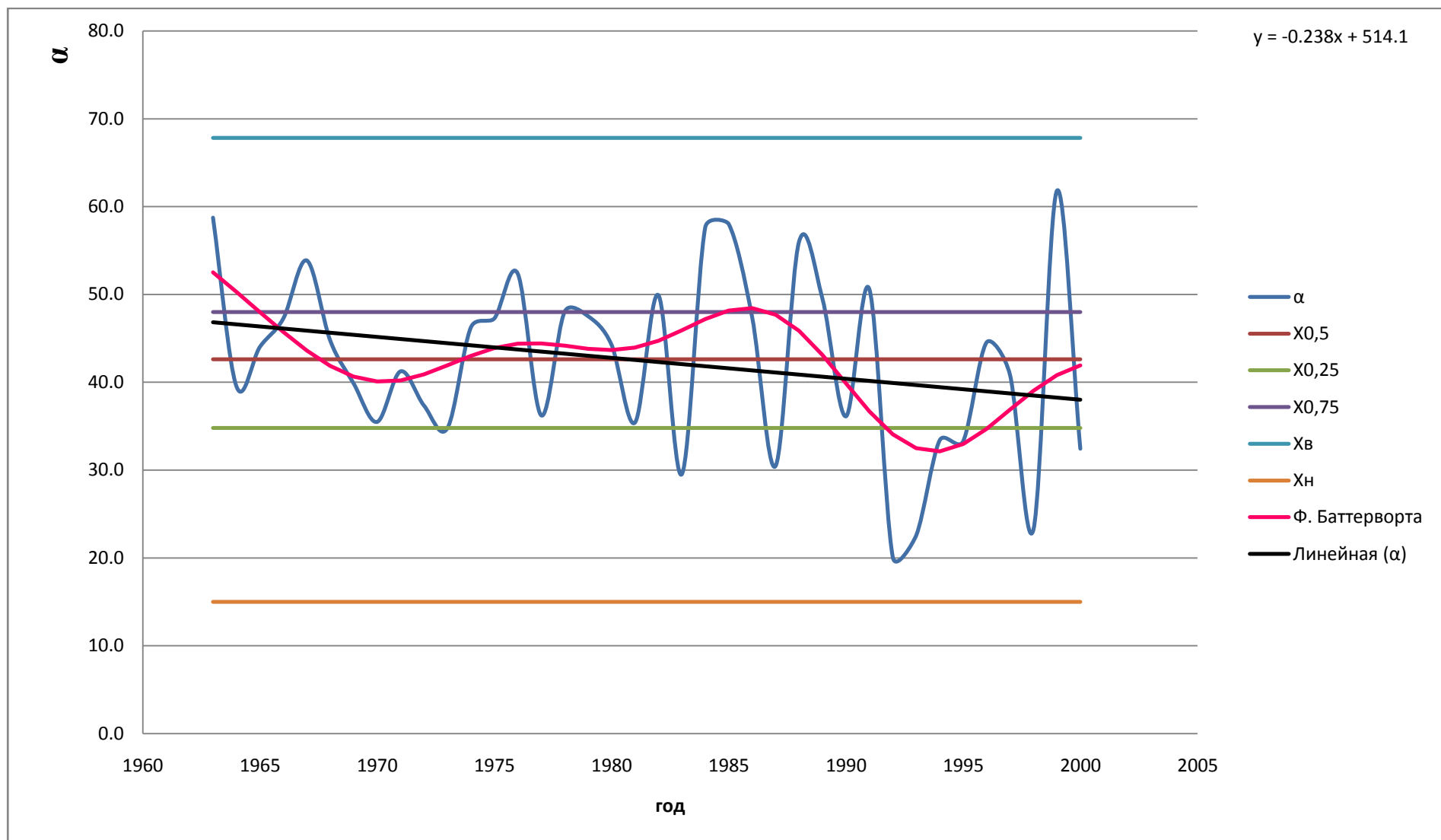


Рисунок 3.10 Временной ход индекса Де-Мартона, 1963-2000, ст. Мзузу

При анализе временного ряда среднегодовых значений по ст. Мзузу (рисунок 3.10) определены квантили, имеющие значения: $X_{0,25} = 34,8$; $X_{0,75} = 48,0$. Определены выходящие за верхний и нижний внутренние барьеры квантили: $X_n = 15,0$; $X_v = 67,8$. медиана составляет $X_{0,5} = 42,6$.

Годы обильного увлажнения (1963, 1974, 1980, 1999 гг. и другие) приведены в таблице 3.2. Они характеризуются в основном из-за выпадения большого количества осадков при незначительной температуре воздуха.

Экстремально недостаточное увлажнение отмечено в 1982 г., также как на ст. Шелека. Этот год характеризуется резким увеличением среднегодовой температуры воздуха ($+17,5$ °C) и уменьшением количества осадков (236,7 мм).

Годы недостаточного увлажнения (1973, 1994, 1998, гг. и другие.) приведены в таблице 3.3. Они характеризуются резким увеличением температуры воздуха и уменьшением количества осадков.

Наличие в ряду экстремальных значений приводит к тому, что на результатах фильтрации Баттерворта наблюдаются периоды локальной нестационарности, связанные с пониженным и повышением значений индекса Де-Мартона. В целом, межгодовая дисперсия увеличилась, как и на ст. Шилека, но немного позднее.

Выявлен значимый отрицательный тренд. Уравнение, описывающее выделенный тренд, приведено на рисунке 3.10.

Таблица 3.2 Годы обильного увлажнения бассейна оз. Ньяса
за период с 1961 по 2000 гг.

м/ст.	ст. Шилека	ст. Лишинга	ст. Мзузу
α	$31,3 \leq \alpha \leq 45$	$43,2 \leq \alpha \leq 59,3$	$31,3 \leq \alpha \leq 45$
годы	1962,1969,1974,1976, 1978,1984-1986, 1989,1997,2000	1961,1963,1965,1969, 1972, 1974, 1980, 1982, 1989, 1999	1963, 1967, 1976, 1978, 1984,1985, 1988, 1991, 1999

Таблица 3.3 Годы недостаточного увлажнения бассейна озера Ньяса
за период с 1961 по 2000 гг.

м/ст.	ст. Шилека	ст. Лишинга	ст. Мзузу
α	$8,6 \leq \alpha \leq 22,2$	$16,5 \leq \alpha \leq 32,5$	$15 \leq \alpha \leq 34,8$
годы	1968, 1975, 1979, 1981, 1983, 1990, 1992, 1994, 1998	1964, 1968, 1973, 1987, 1990, 1992, 1994, 1995, 1998	1973, 1982, 1983, 1987, 1992-1995, 1998, 2000

Ввиду разнообразия условий, в которых расположены метеостанции, различным характером изменения значений метеорологических параметров и их отличиями их абсолютных значений, довольно непросто выбрать наиболее репрезентативную станцию для анализа зависимостей между метеорологическими элементами и уровнем оз. Ньяса. Можно рекомендовать станцию Мзузу, расположенную на северо-западном берегу озера на высоте 1254 м. на расстоянии около 15 км от уреза воды, и станцию Шилека, расположенную к югу от озера на высоте 767 м. в зоне затопления при обильных осадках.

3.4 Внутригодовая изменчивость количества осадков

На станция Мзузу за весь период отмечен тренд на уменьшение количества осадков ($\Delta P = -100$ мм) однако, в течение сезона дождей, за многолетний период, в некоторые месяцы количество осадков может уменьшаться, а в некоторые – увеличиваться (рисунок 3.11).

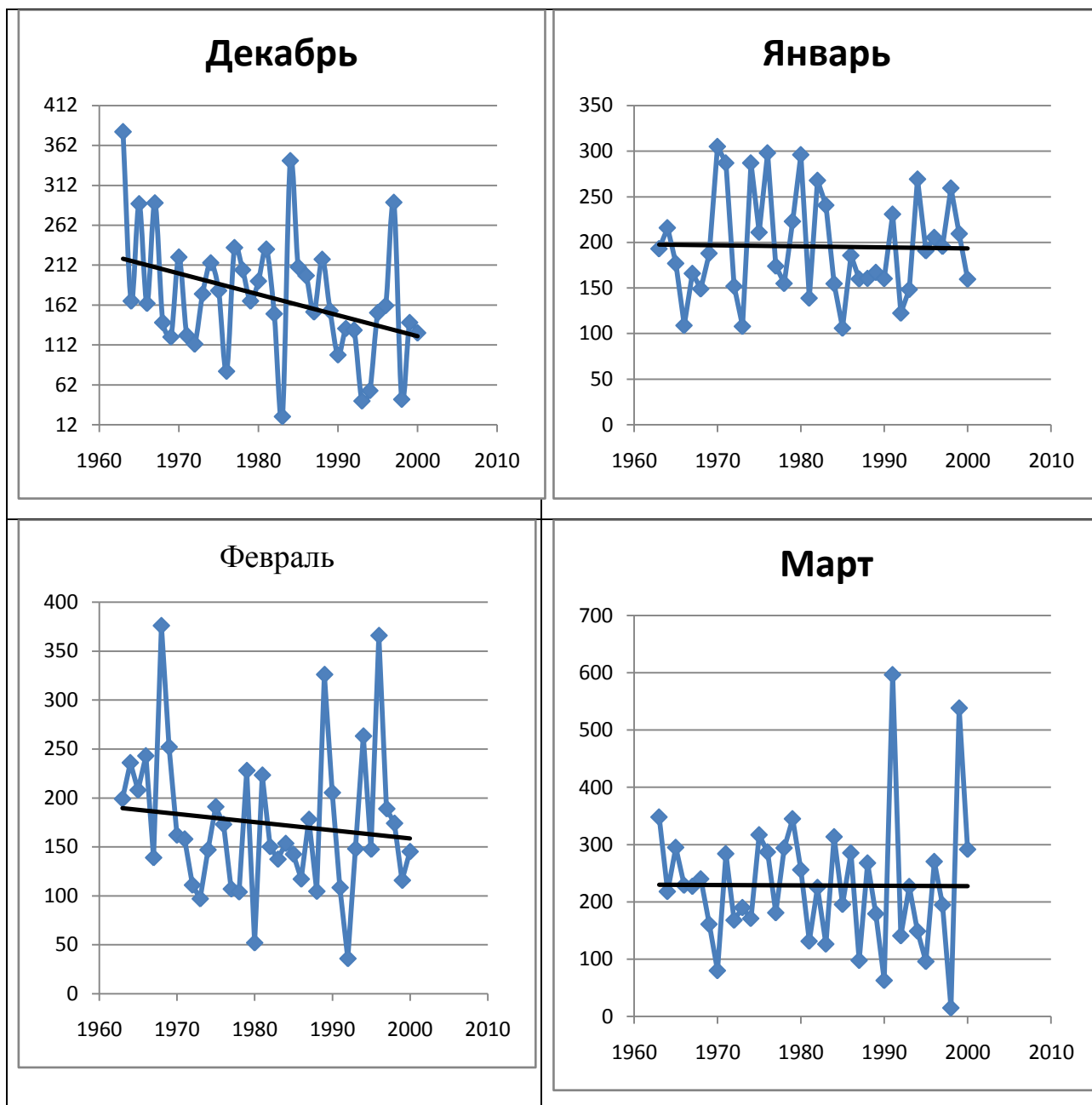


Рисунок 3.11 Изменение количества осадков в сезон дождей, ст. Мзузу

На станция Лишинга за весь период отмечен тренд на уменьшение количества осадков ($\Delta P = -300$ мм) (рисунок 3.12), однако, в течение сезона дождей характер изменения различен.

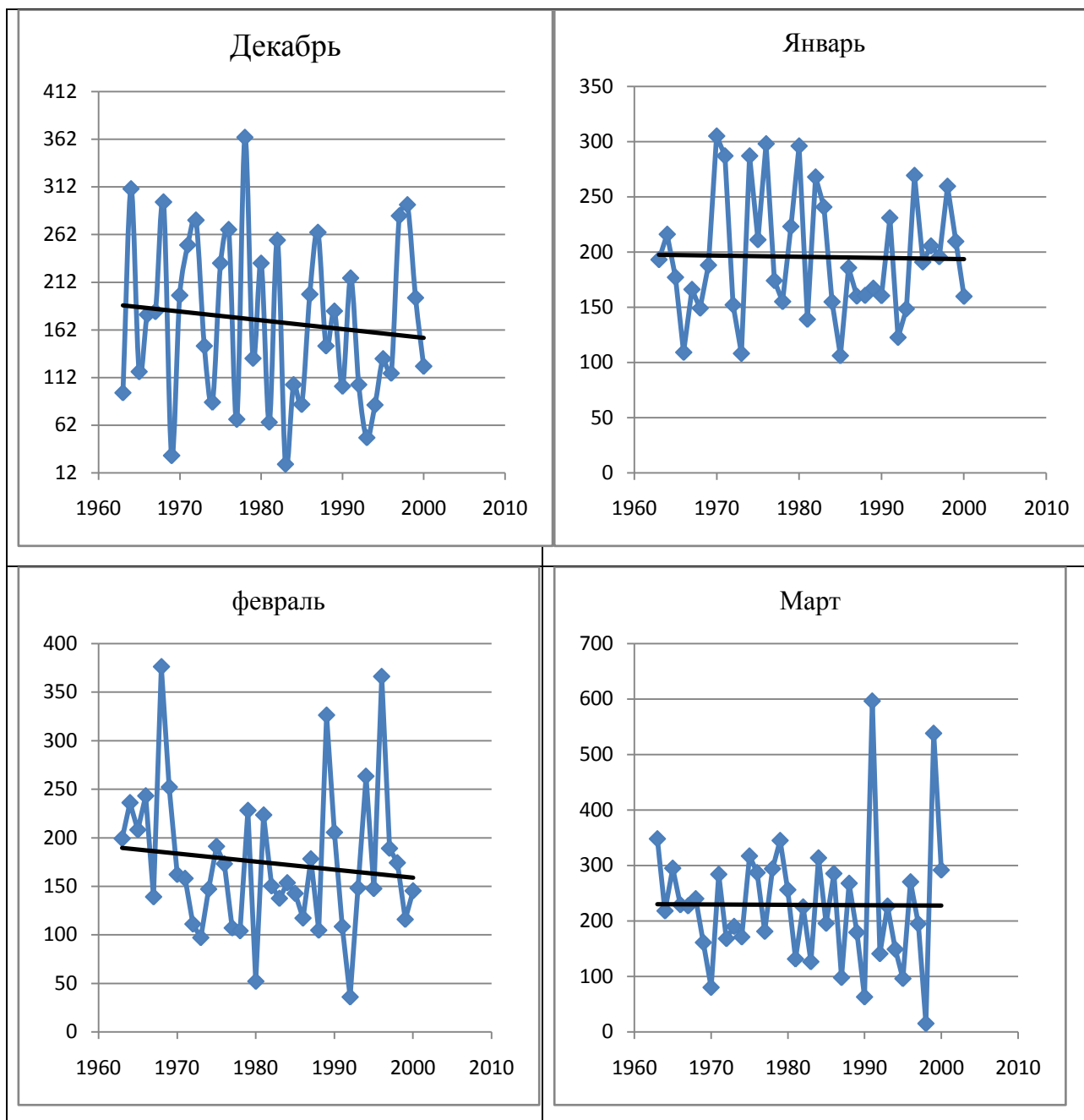


Рисунок 3.12 Изменение количества осадков в сезон дождей, ст. Лишинга

На станция Шилека за весь период наблюдений не отмечен тренд изменения количества осадков. В течение сезона дождей (рисунок 3.13) изменения количества осадков в разные месяцы разнонаправленно.

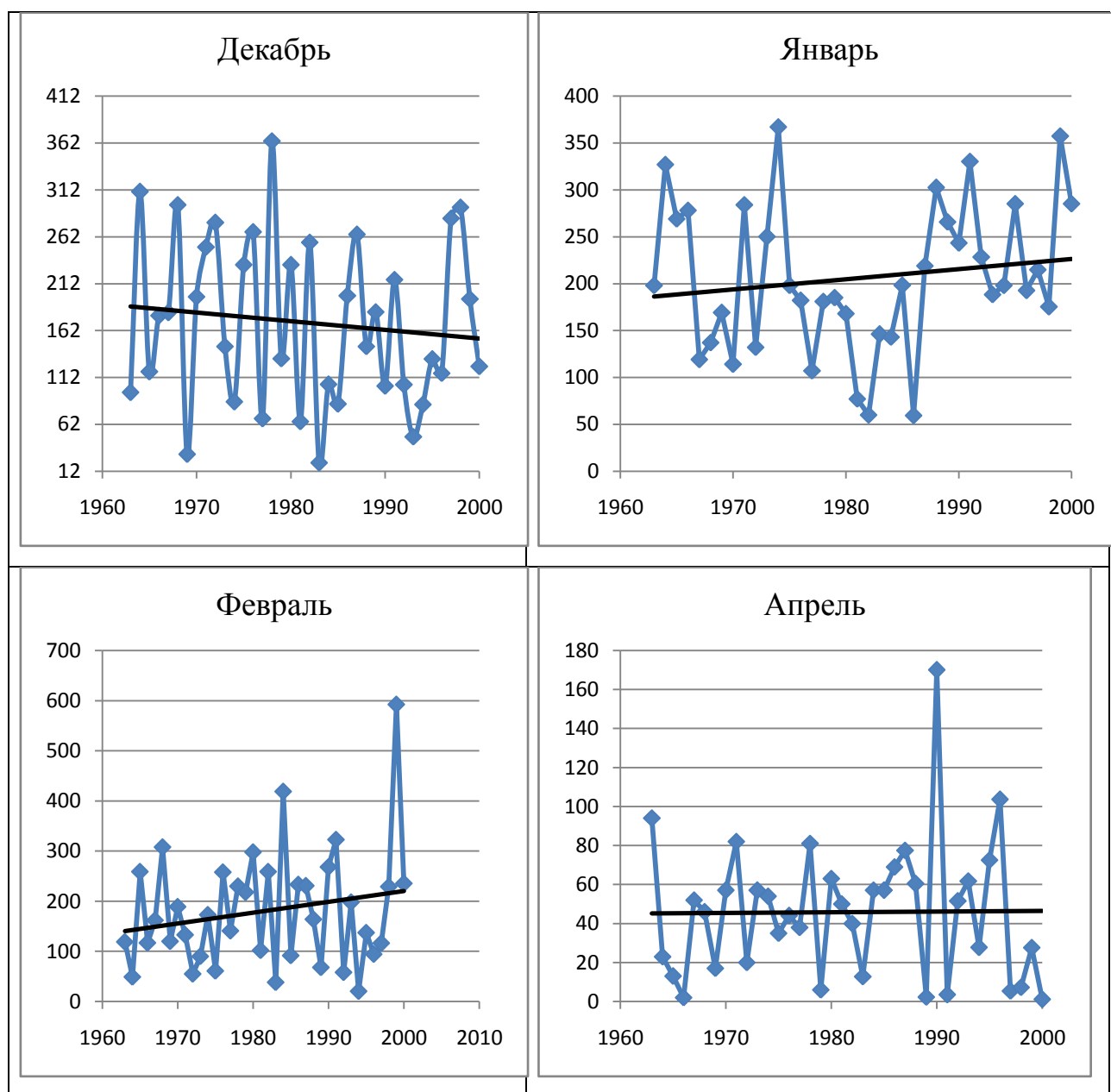


Рисунок 3.13 Изменение количества осадков в сезон дождей, ст. Шилека

3.5 Анализ межгодовой и внутригодовой изменчивости уровня Ньяса

Анализ многолетних колебаний уровня воды в озере показывает, что высокие стояния уровня в озере наблюдались регулярно на протяжении более 100 лет наблюдений. Можно отметить высокий коэффициент автокорреляции годовых последовательностей уровня, что в целом

свойственно замкнутым и слабо-проточным водоемам, коэффициент водообмена которых невелик.

При анализе временного ряда уровней воды оз. Ньяса (рисунок 3.10), определены квантили, имеющие значения: $X_{0,25}=473,5$ м; $X_{0,75}=474,1$ м. В эти пределы попадают наибольшее количество лет за расчетный период.

Определены выходящие за верхний и нижний внутренние барьеры квантили: $X_n = 472,7$ м; $X_v = 474,9$ м медиана составляет $X_{0,5} = 473,8$ м. Максимальный уровень 475 м наблюдался в 1981 г., а минимальный 472,8 м в 1956 г. Таким образом, амплитуда изменения уровня воды достигает 2,2 м.

Совместный анализ временного хода значений индекса Де-Мартона ст. Мзузу и среднегодовых уровней воды показал соответствие между ними. Так повышенные уровни в период 1974-1988 гг. можно объяснить повышенной увлажнённой этого периода, а пониженные уровни в период 1967-1973 гг. и в 1990-2000 гг. – пониженной увлажнённой.

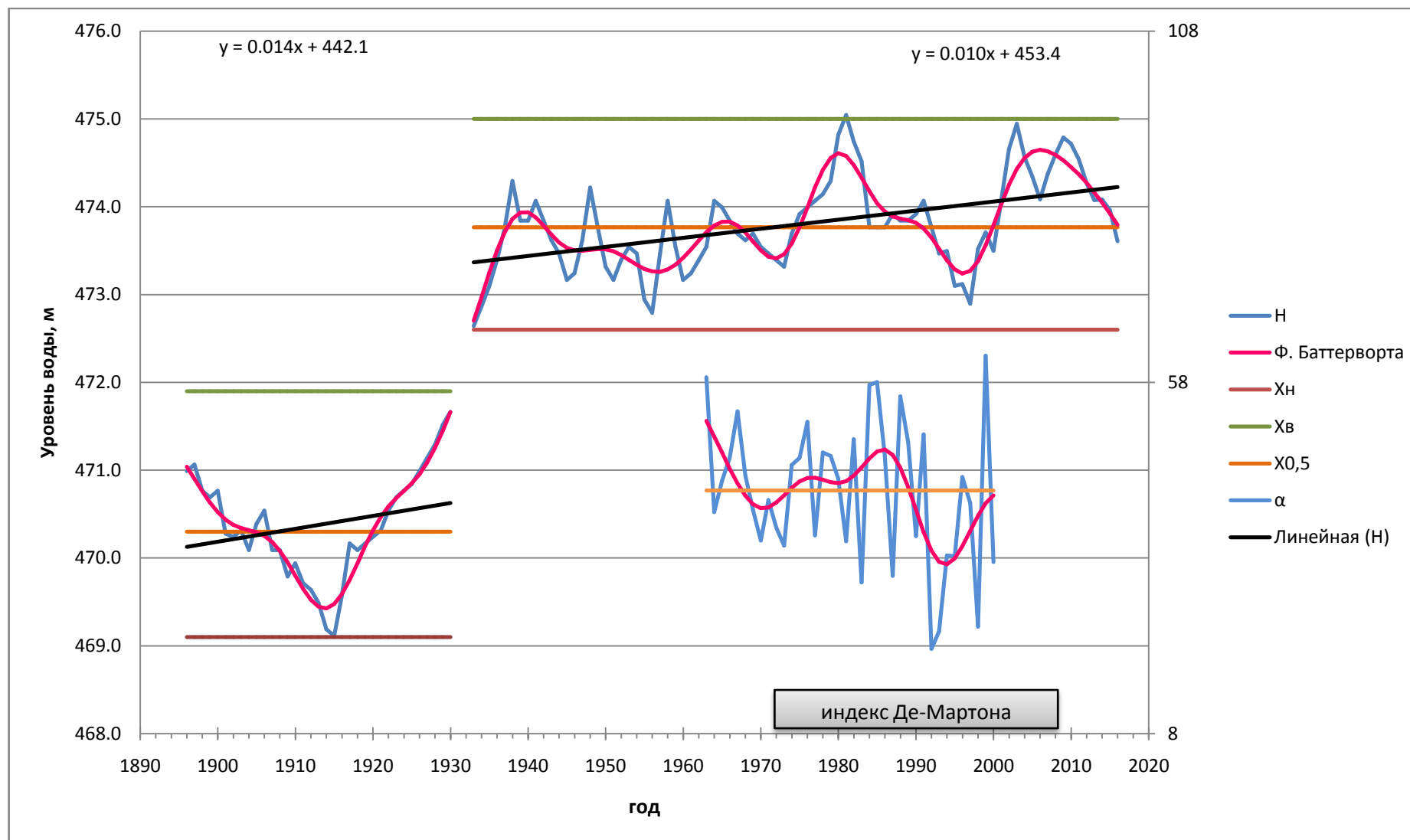


Рисунок 3.10 Временной ход уровня оз. Ньяса и индекса Де-Мартона (ст. Мзузу)

4 Моделирование зоны затопления с помощью ArcGIS

4.1 Характеристики котловин водоемов

Объем воды в водоеме W определяется аналитически, путем представления части котловины, заполненной водой, в виде правильной геометрической фигуры. На практике чаще всего используются методы призм и усеченного конуса. Для их применения необходимо иметь схему озера в масштабе и с изобатами. Такая схема для Ньяса была заимствована из [Delvaux, 1995] (рисунок 4.1).

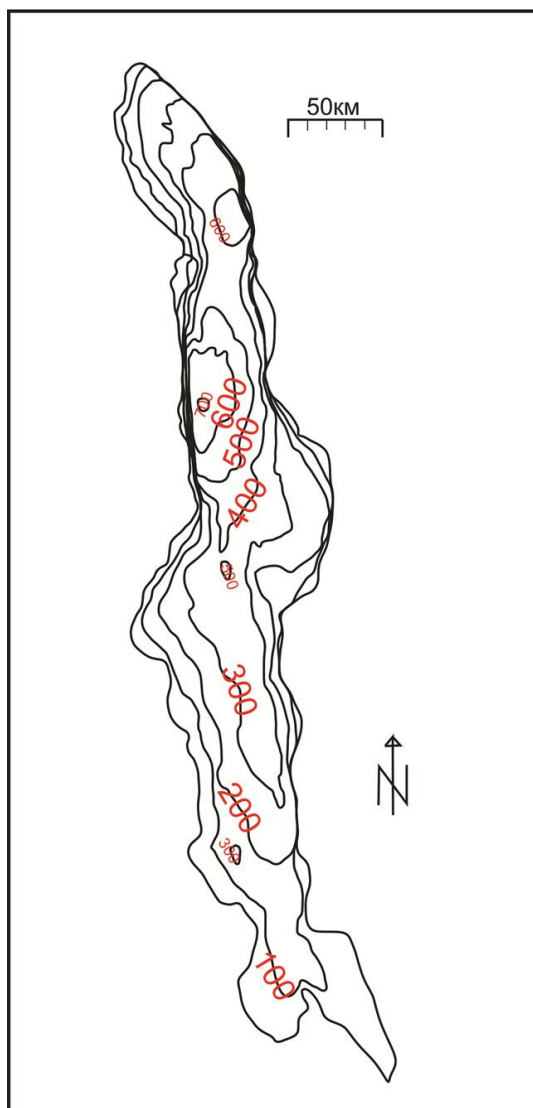


Рисунок 4.1 Карта–схема оз. Ньяса в изобатах

Расчет методом призм заключается в определении суммы объемов отдельных слоев котловины, представляющих собой усеченные призмы,

каждая из которых разделена горизонтальными плоскостями. Эти плоскости не что иное, как площади зеркала водоема при различном стоянии уровня воды (площади, ограниченные изобатами). Расчет ведется по формуле:

$$W = \frac{f_0+f_1}{2} H_1 + \frac{f_1+f_2}{2} H_2 + \dots + \frac{f_{n-2}+f_{n-1}}{2} H_{n-1} + \frac{f_{n-1}+f_n}{2} H_n, \quad (4.1)$$

где $f_1, f_2, \dots, f_n$ – площади, ограниченные изобатами;

$H_1, H_2, \dots, H_n$ – вертикальное расстояние между изобатами.

4.2 Батиграфическая и объемная кривые

Батиграфическая $f_0 = f(H)$ и объемная $W = f(H)$ кривые строятся на основании расчетов площадей зеркала $f_0, f_1, f_2, \dots, f_n$ и объемов воды $W, W_1, W_2, \dots, W_n$, соответствующих разному наполнению водоема. Эти площади определялись с помощью AutoCAD по оцифрованной схеме озера в изобатах (таблица 4.1). Вычисленная площадь поверхности озера очень близка к общепринятому значению $29\,600\text{ км}^2$.

Объём котловины был рассчитан двумя методами. Значения, полученные обоими методами, различаются незначительно, но значение, полученное методом призм $7808,20\text{ км}^3$, ближе к общепринятой величине $8\,400\text{ км}^3$. Заметное различие объясняется приближенностью батиграфической схемы (изобаты проведены через 100 м).

Определён показатель формы котловины как отношение средней вычисленной глубины озера 264 м (отношение объёма озера к площади поверхности) к максимальной глубине 706 м. Значение близко к 0,4, что соответствует промежуточной (между конусом и параболоидом) форме котловины Ньяса.

Таблица 4.1 Вычисление объема котловины озера методом призм

Глубина Н, м	Площадь ограничения изобатами f_n , км ²	Полусумма площадей $\frac{f_{n-2}+f_{n-1}}{2}$, км ²	Сечение изобаты Н _n , км	Объем между изобатами $\frac{f_{n-2}+f_{n-1}}{2}$, км ³	Нарастание объемов $\sum W_n$, км ³
0	29595	26730,38	0,1	2673,04	7808,20
100	23865,76				5135,16
200	17949,16	20907,46	0,1	2090,75	3044,41
300	11759,40	14854,28	0,1	1485,43	1558,98
400	5873,98	8816,69	0,1	881,67	677,32
500	2418,12	4146,05	0,1	414,60	262,71
600	1403,82	1910,97	0,1	191,10	71,61
700	26,84	715,33	0,1	71,53	0,081
706	0	13,42	0,006	0,081	0

По данным расчётов построены батиграфическая и объемная кривые для озера (рисунок 4.2). В практике расчетов нередко строят кривые $f_0 = f(H)$ и $W = f(H)$ лишь для слоя, в пределах которого могут наблюдаться колебания уровня воды.

Поскольку сезонные и межгодовые изменения уровня воды в Ньяса, как правило, незначительные, то точность построенных кривых не позволяет надёжно оценить возможные изменения площади поверхности озера, что необходимо для анализа формирующихся в районе озера наводнений и прогноза площадей затопления при значительном повышении уровня.

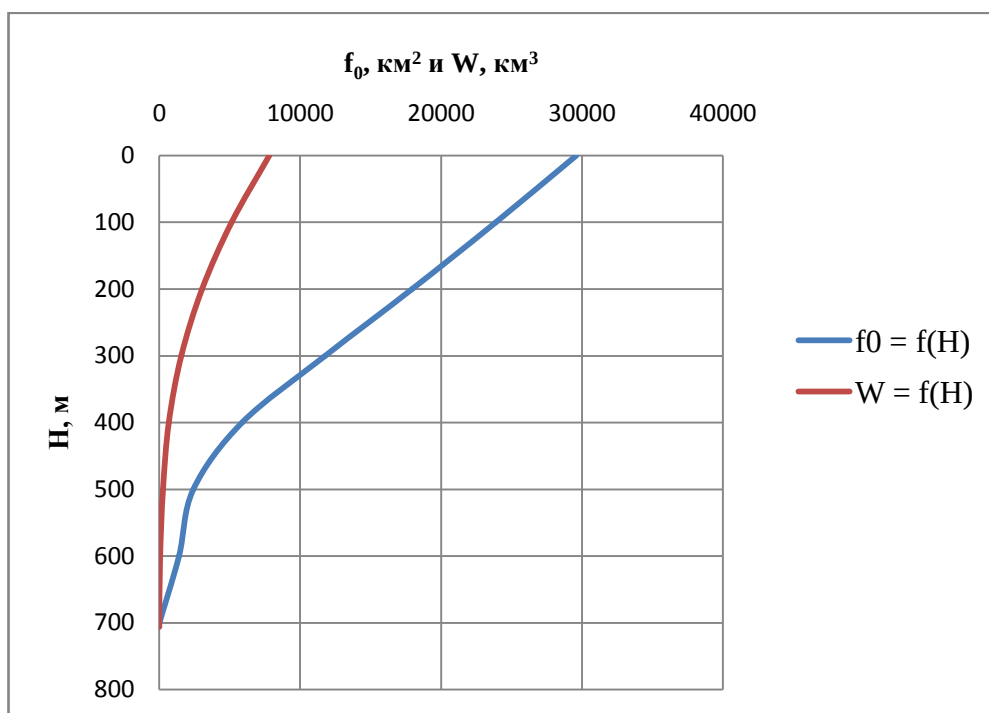


Рисунок 4.2 Батиметрическая $f_0 = f(H)$ и объемная $W = f(H)$ кривые оз. Ньяса

4.1 ArcGIS и цифровая модель рельефа.

Для оценки площадей затопления прибрежной зоны оз. Ньяса при разных характерных уровнях в ArcGIS была построена цифровая модель рельефа. ArcGIS – семейство программных продуктов американской компании ESRI, одного из лидеров мирового рынка геоинформационных систем. ArcGIS позволяет представить в виде цифровой карты большие объёмы статистической информации, имеющей географическую привязку. В среде создаются и редактируются карты различных масштабов.

Цифровая модель рельефа ЦМР – это растровое представление непрерывной поверхности. Точность ЦМР определяется, в первую очередь,

разрешением. Также на точность влияет и тип данных. Источниками данных для построения ЦМР служат топографические карты, стереопары аэро- и космических снимков, данные радиолокационной съемки и т.п. Максимально точная модель получается при построении по данным воздушного и наземного лазерного сканирования. На данный момент самыми распространенными являются ЦМР на основе ячейки. Они используются в качестве входных данных для компьютерной количественной оценки характеристик земной поверхности.

Цифровая модель представляет собой трёхмерное отображение реального рельефа местности (рисунок 4.3) на момент производства аэросъемочных работ, что позволяет использовать его для решения различных прикладных задач. Для решения таких задач требуются цифровые модели рельефа с различной плановой и высотной точностью. На точность построения рельефа оказывают влияние пространственное разрешение и геометрическое качество изображений, состояние атмосферы, масштаб карты, точность опорных точек и др.

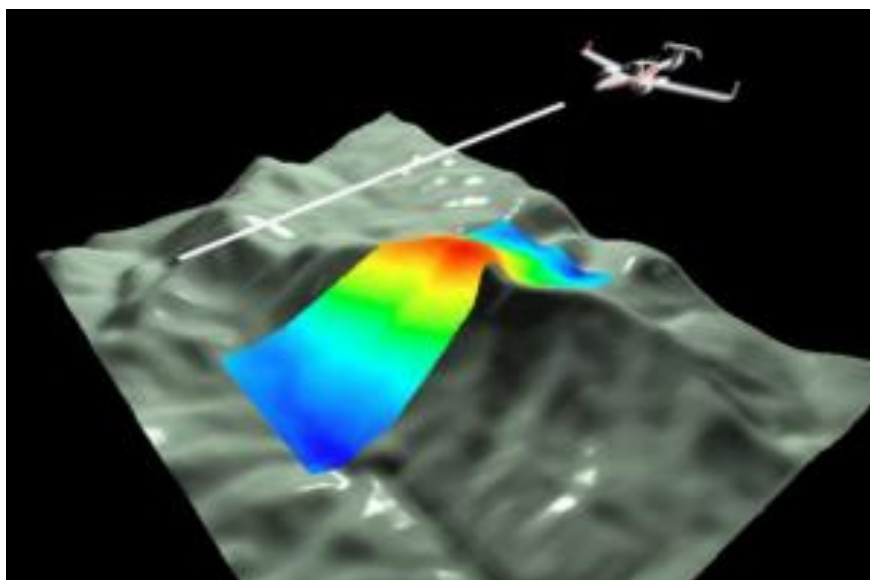


Рисунок 4.3 Схема пример цифровой модели рельефа и наложения на нее данных. Цветом показана абсолютная высота каждой точки.

Для построения ЦМР прибрежной части водосбора Ньяса использована ЦМР SRTM (Shuttle radar topographic mission) – радарная топографическая

съемка большей части территории земного шара (за исключением самых северных ($>60^\circ$ с.ш.), самых южных широт ($>54^\circ$ ю.ш.), а также океанов), произведенная в феврале 2000 г. с помощью специальной радарной системы с борта космического корабля многоразового использования «Шаттл» (рисунок 4.4).

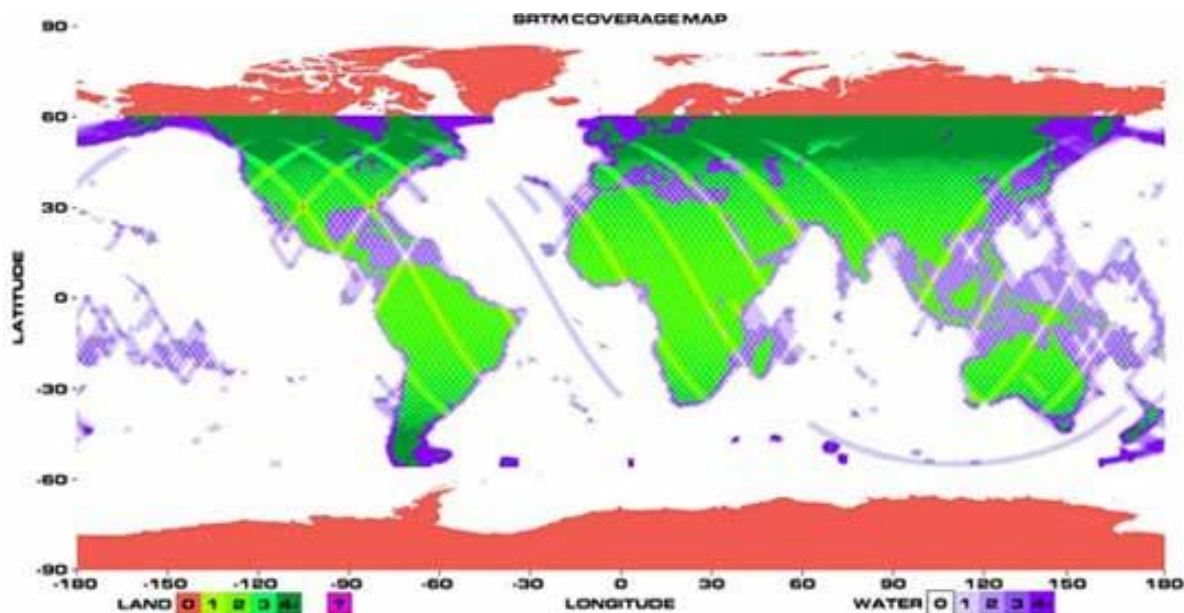


Рисунок 4.4 Покрытие территории Земли съемкой SRTM

В работе использовались 3-х секундные данные (пространственное разрешение 90 м). Файлы данных представляют собой матрицу из 1201x1201 значений, которая может быть импортирована в различные программы построения карт и ГИС [<http://www.gis-lab.info>].

Также в ArcGIS встроен широкий инструментарий анализа пространственной информации, в том числе модуль Spatial Analyst и инструменты модуля Гидрология. Это набор моделей данных и инструментов анализа геопространственных и временных данных. Spatial Analyst/Hydrology обладает функциональными возможностями, которые можно расширять, добавляя в базу данных структуры и функции, необходимые для выполнения определенных задач или работы с соответствующими приложениями. В результате оказывается возможным, в том числе выделять водосборные бассейны в растровом и векторном формате и получать их характеристики,

определять и анализировать элементы гидрографической сети, определить дренажную систему (рисунок 4.5) и её характеристики.

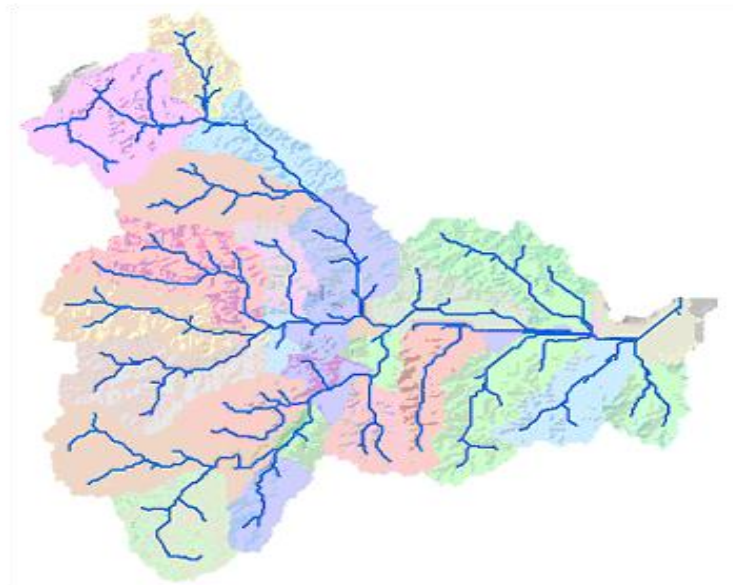


Рисунок 4.5 Сеть водотоков, полученных на основе ЦМР

С помощью ArcGIS, по стандартному алгоритму, многократно успешно применяемому на кафедре гидрологии суши РГГМУ, был выделен водосбор оз. Ньяса (по месту вытекания из него р. Шире). Очертания водосбора хорошо соответствуют имеющимся в открытых источниках (рисунок 4.6). Площадь водосбора вместе с площадью озера составила 128 186 км².

Необходимо отметить, что в литературе часто встречается ошибочное значение площади водосбора Ньяса, равное 6 340 км².

Выполнена оценка зон затопления, основанная на ЦМР, построенной по листам топографической карты Генштаба масштаба 1:500 000 при уровнях, зафиксированных в моменты чрезвычайных ситуаций в населенных пунктах, расположенных на побережье. Данная оценка проводилась при отметке уреза 472 м БС. Результаты представлены в таблице 4.2.

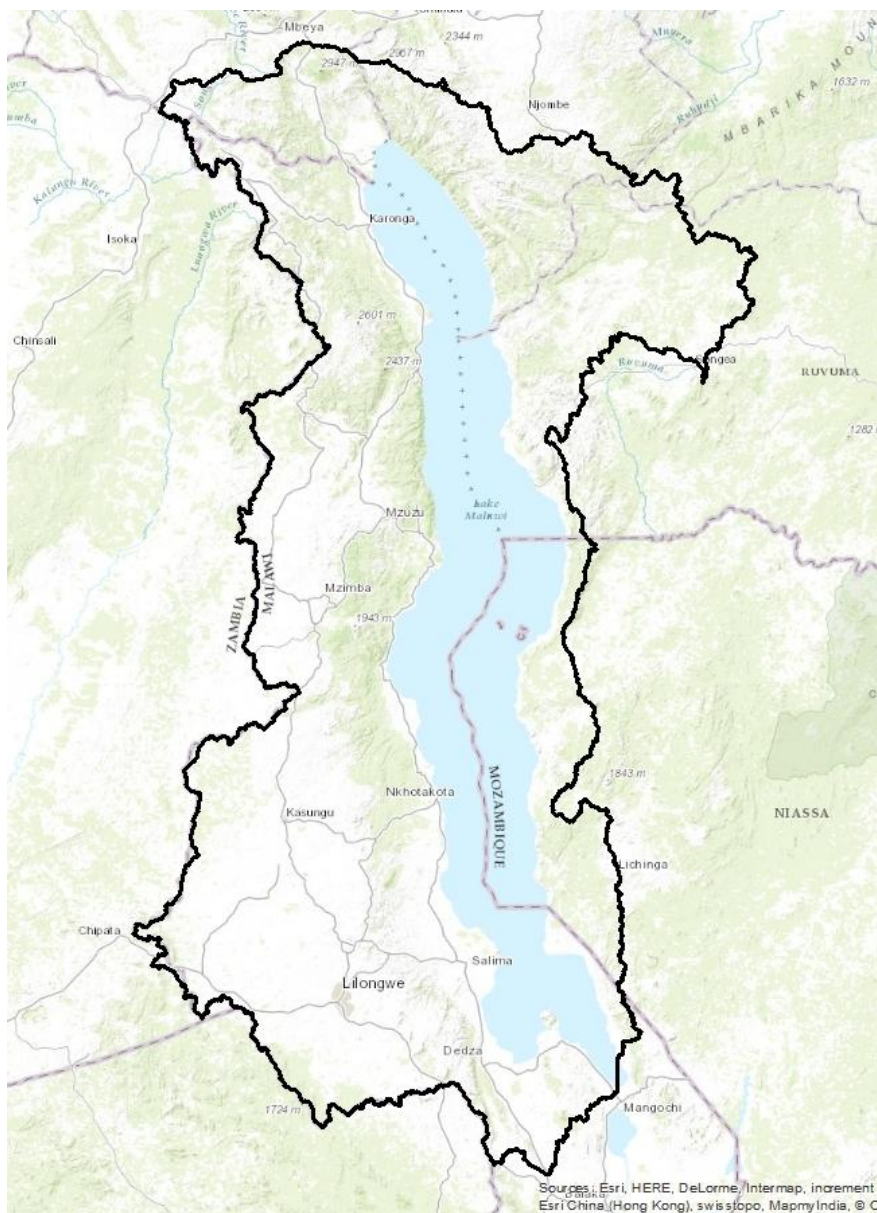


Рисунок 4.6 Водосбор оз. Ньяса

Таблица 4.2 Площади зон затопления

Уровень, м – Обеспеченность %	Затопляемая площадь, км ²
474,19 – 74%	199
475,8 – 1,5%	348

Обеспеченность уровней определена по кривой обеспеченности максимальных наблюденных уровней за период с 1993 г. по 2016 г., для построения которой использованы спутниковые данные (см. Приложение).

Уровень 474,19 м зафиксирован в конце января 2015 г., когда наблюдалось разрушительное наводнение в долине р. Шире, Малави, и в северо-западной части Мозамбика. По имеющимся данным, пострадало несколько сот тысяч человек и только в Малави было затоплено 653 км² (рисунок 4.7)

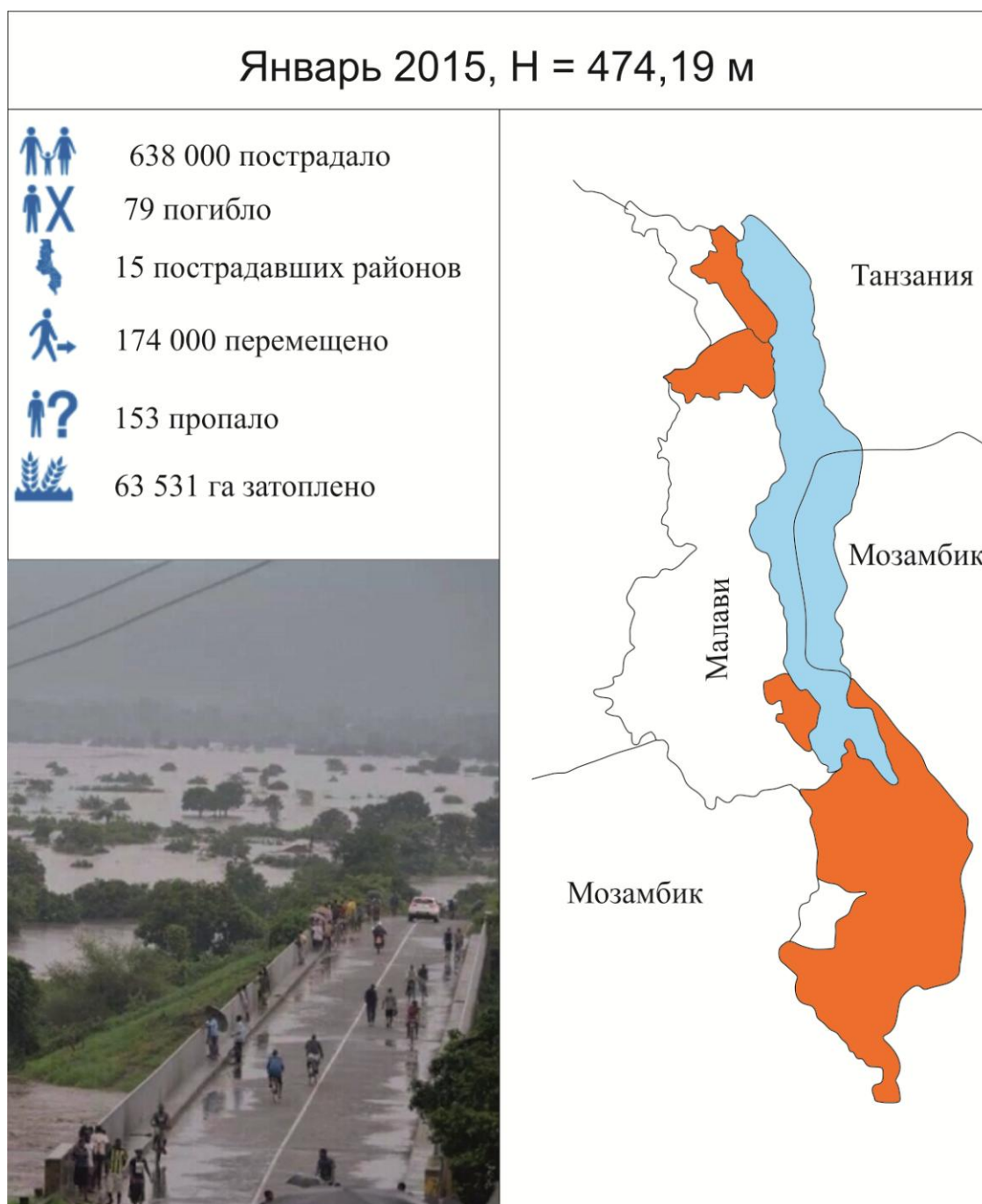


Рисунок 4.7 Последствия наводнения в январе 2015 г.

Поэтому можно предположить, что повышение уровня Ньяса – это только один из одновременно действующих многочисленных факторов, способствующих формированию затопления прибрежных низменных районов: повышение уровня Шире и её притоков, озёр, подпор течения впадающих в озеро рек, недостаточная пропускная способность русла Шире.

Помимо этого, следует учитывать значительное поступление в озеро подземных вод, высокие запасы которых обнаружены вблизи озера (рисунок 4.8).

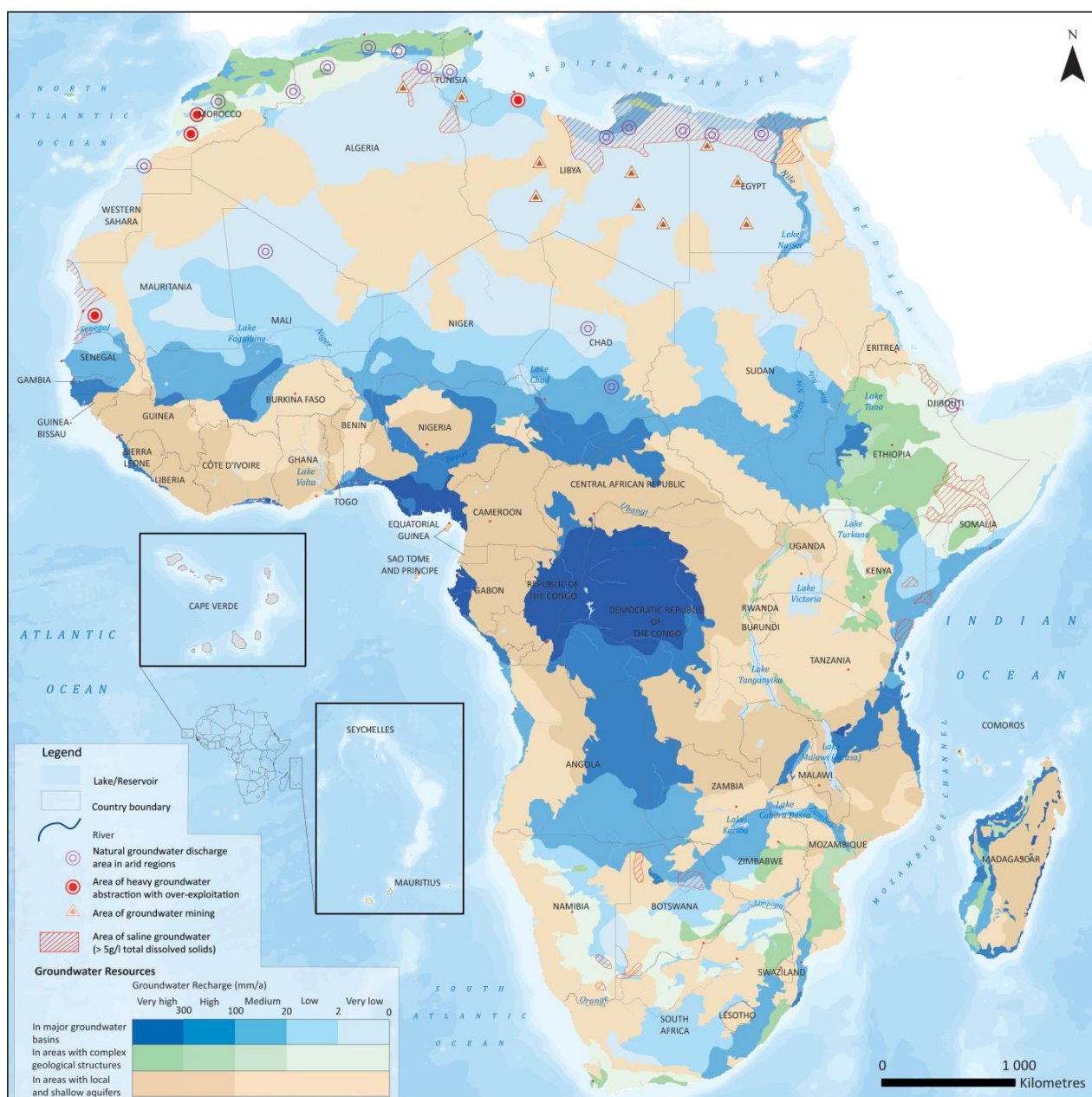


Рисунок 4.8 Подземные воды в Африке

Заключение

В результате выполнения всех поставленных задач была достигнута цель исследования – выявлены закономерности и особенности уровня оз. Ньяса. Проанализированы результаты изучения изменений уровня озера, доступные в научной литературе. Методами математической статистики, квантильного анализа и с использованием фильтрации Баттерворта определены количественные характеристики многолетнего изменения уровня озера, а также температуры воздуха и годовых сумм осадков (по данным трёх метеостанций). Показано, что многие рассматриваемые ряды неоднородны как по величине среднего, так и по дисперсии. Первое можно объяснить наличием значимых трендов, а второе – влиянием отмечающегося в регионе изменения климата. Был рассчитан комбинаторный показатель увлажнённости (индекс Де-Мартона) для трёх метеостанций, временной ход которого свидетельствует об устойчивом уменьшении увлажнённости района. Вероятно, это является результатом одновременного уменьшения годовых сумм осадков и повышения температуры воздуха, приведшего к увеличению испарения.

В результате наблюдается сложный характер изменения уровней озера как в многолетнем разрезе, так и в течение года. Многолетний ход значений индекса увлажнённости Де-Мартона (ст. Мзузу) и среднегодовых уровней воды показал соответствие между ними.

Для определения взаимосвязи между изменениями уровня, объёма и площади озера с помощью программы AutoCAD рассчитаны площади поверхности озера при различных уровнях и оценен объём озера. По данным расчётов построены батиграфическая и объёмная кривые, ранее не встречавшиеся в открытых источниках. Для более точного определения площадей зон затопления в ArcGIS создана цифровая модель рельефа прибрежной зоны водосбора озера (а также выделен и весь его водосбор). Оценки зон затопления при различных характерных уровнях подтверждают

предположение о том, что наводнения в рассматриваемом районе формируются, помимо повышения уровня оз. Ньяса, в результате одновременного влияния нескольких гидрометеорологических факторов: повышение уровней рек и озёр прибрежных равнин, подпор втекающих в Ньяса рек, недостаточная пропускная способность р. Шире, уменьшаемая отмелью в её истоке, разгрузка подземных вод. С помощью ЦМР оценена только роль повышения уровня озера в формировании затопления; различия в полученных результатах, по сравнению с приводимыми в открытых источниках, объясняются, с одной стороны, дополнительным воздействием указанных выше факторов, а с другой – несовершенством модели ЦМР, не смотря на уточнение её с помощью карт Генштаба 1:500 000.

Полученные результаты могут служить надёжной основой углублённого исследования водного режима оз. Ньяса.

Использованные источники

- Богословский Б.Б. Внешний водообмен водоемов и некоторые особенности водных масс пресных озер // Труды Всесоюзного симпозиума по основным проблемам пресноводных озер. Т. I. Режим озер. Вильнюс, 1970. С. 237-258.
- Johnson T.C. and Odada E.O., The limnology, climatology and paleoclimatology of the East African lakes, eds. 1996, pp. 103-139. Amsterdam
- Ramillien G., Frappart Fr. and Seoane L. Application of the Regional Water Mass Variations from GRACE Satellite Gravimetry to Large-Scale Water Management in Africa // Remote Sensing 2014, 6(8), 7379-7405; doi:10.3390/rs6087379
- Carter J. Malawi: wildlife, parks and reserves. Basingstoke, 1987.
- Eccles D. - An outline of the physical limnology of Lake Malawi (Lake Nyasa). - Limnol. Oceanogr., 1974, pp. 730-742.
- Kumambala P.G and Ervine A. Water Balance Model of Lake Malawi and its Sensitivity to Climate Change, 2010. pp. 152-162
- Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Великие озера мира. СПб.: «ЛЕМА», 2012. 75 с.
- Delvaux D. 1995 Age of lake Malawi (Nyasa) and water level fluctuations. Mus. roy. Afr. centr., Tervuren (Belg.), Dept. Geol. Min., Rapp. ann., 1995. pp. 99-108.
- Bootsma, H.A., Bootsma M.S., and Hecky R.E. 1996 The chemical composition of precipitation and its significance, to the nutrient budget of lake Malawi, 1996. pp. 251-266
- Догановский А.М. Гидрология суши (общий курс): Учебник / А.М. Догановский; РГГМУ. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2012.
- Scholz, C.A., and Rosendahl.B.R. 1988. Low lake stands in Lakes Malawi and Tanganyika, delineated with multifold seismic data. Science 240: 1645-1648.
- Pike, J. G., Rimmington G. T. Malawi a Geographical Study. Published by Oxford University Press, London (1965)
- Дружинин В.С. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации / В.С. Дружинин, А.В. Сикан. СПб: изд. РГГМУ, 2001.

ArcGISResources: Что такое цифровые модели рельефа [Электронный ресурс].–Режим_доступа:

resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#//009z00000005n0000000/

Геокосмос Цифровая модель рельефа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geokosmos.ru/services/dtm/>

Тикунов В. С. Геоинформатика, МГУ, 2004 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://edu-knigi.ru/tikunov/geoinformatika.php>

Костин А. В. Цифровая модель рельефа (Методы создания и направления использования) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://st-yak.narod.ru/pdf/20-5.pdf/>

Описание и получение данных SRTM [Электронный ресурс].– Режим_доступа: <http://www.gis-lab.info>

Мякишева Н.В. Рациональное использование и охрана водных ресурсов / Н.В. Мякишева –СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. -95 с.

Рожков В.А. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Книга I / В.А. Рожков –СПб.: гидрометиздат, 2001. -340 с.