

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. Н.Л. ДОБРЕЦОВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ГИН СО РАН)

УДК 556.314

Рег. № НИОКТР 121112400008-2

Инв. № 6

УТВЕРЖДАЮ

Директор ГИН СО РАН

Д.Г. Мень



А.А. Цыганков

2023 г.

Протокол № 12 от «21» декабря 2023 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Исследование негативных физико-геологических явлений
на восточном побережье Байкала для разработки рекомендаций
по защите инженерных сооружений и уникальных природных образований
при подъеме уровня воды в озере
(заключительный)

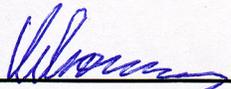
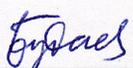
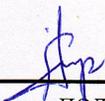
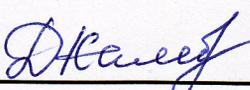
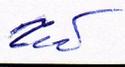
Номер проекта в ИС управления НИР
FWSG-2021-0006 (рег. № 1021102217066-9-1.5.14)

Приоритетное направление 1.5.11.3. Прогнозирование гидрологического цикла и опасных гидрологических явлений. Научное обеспечение водной безопасности страны

Руководитель НИР,
зав.лаб., д.г.-м.н.

А.М. Плюснин

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Должность	Подпись	ФИО
Руководитель НИР, заведующий лабораторией, д.г.-м.н.,	 _____	Плюснин А.М. (реферат, разделы 1-6)
Исполнители:		
Старший научный сотрудник, к.г.-м.н.,	 _____	Будаев Р.Д. (раздел 4.2,4.3)
Старший научный сотрудник, к.г.-м.н.	 _____	Украинцев А.В. (раздел 4.3, 4.6, 4.7).
Научный сотрудник, к.т.н.	 _____	Базаров А.Д. (раздел 4.6)
Научный сотрудник, к.г.- м.н.	 _____	Жамбалова Д.И. (раздел 4.7)
Научный сотрудник, к.г.н.	 _____	Перязева Е.Г. (раздел 4.1, 4.4, 4.5)
Научный сотрудник, к.г.н.	 _____	Чернявский М.К. (раздел 4.2, 4.3, 4.6)
Младший научный сотрудник	 _____	Чередова Т.В. (раздел 4.4, 4.7)
Нормоконтроль	 _____	Чернявский М.К.

РЕФЕРАТ

Отчет 45 с., 21 рис., 6 табл., 14 источн., 2 прил.

УРОВЕНЬ ВОДЫ, ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ НАВОДНЕНИЯ, ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, МЕТОДИКА РАСЧЕТА АБРАЗИИ, ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ АБРАЗИИ, ЭРОЗИЯ, ПОДТОПЛЕНИЕ

Цель работы – выявление и исследование негативных физико-геологических явлений, протекающих на побережье Байкала. Создание методики оценки развития абразионных процессов на побережье, прогноз интенсивности экзогенных процессов в береговой зоне озера при изменении уровня.

Методы исследования – наблюдение на природных объектах; геофизические методы выявления неоднородностей в осадочных породах, залегающих на побережье; бурение скважин с отбором грунтов и измерением уровня залегания грунтовых вод; камеральная обработка спутниковых снимков и результатов полевых исследований; статистическая обработка результатов исследования.

Полученные результаты: Разработана методика оценки интенсивности протекания абразионных процессов, учитывающая длительность высокого стояния воды в озере. Методика позволяет достоверно оценивать масштабы разрушения берегов, сопоставлять абразию берегов при разном максимальном уровне воды в озере. На основании предложенной методики сделан прогноз развития абразии при подъемах уровня озера до 457.4, 457.5, 457.6, 457.7, 457.8, 457.85м. Установлены основные закономерности формирования подтопления на восточном побережье Байкала. Показано, что в многоводные годы по проницаемым зонам происходит внедрение озерных вод на сушу. Показано, что на протяжении длительного времени происходит уменьшение площади дельты р. Селенги.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	7
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	8
1. Обоснование количественной оценки разрушения побережья Байкала....	10
2. Влияние геологического строения берега.....	14
3. Проверка достоверности методики.....	21
4. Сравнение с результатами государственного мониторинга.....	27
5. Прогноз развития абразии в многоводные годы.....	31
6. Подтопление восточного побережья Байкала.....	35
7. Изменение рельефа в районе дельты Селенги.....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	40
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	41
ПРИЛОЖЕНИЯ	43
Приложение А. Список работ опубликованных по данному этапу.....	43
Приложение Б. Список работ, опубликованных по тематике проекта в соответствии с государственным заданием.....	44

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Абразия —	процесс механического разрушения и сноса горных пород в береговой зоне водоёмов волнами и прибоем, а также воздействием переносимого водой обломочного материала
Аккумуляция —	процесс накопления рыхлого минерального вещества на поверхности Земли
Буна –	поперечное берегозащитное сооружение, предназначенное для накопления пляжа, предохраняющего берег от размыва
Пляж–	элементарная аккумулятивная форма рельефа, образовавшаяся в зоне прибойного потока
Прибойный поток или накат–	движение воды, возникающее между зоной последнего (ближайшего к берегу) разрушения волн и линией заплеска
Эрозия –	процесс разрушения горных пород водным потоком

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГП – горные породы

ГЭС – гидроэлектростанция

ООПТ – особо охраняемая природная территория

БС – Балтийская система высот

ТО – Тихоокеанская система высот

ПГС – песчано-гравийная смесь

ЛЭП – линия электропередачи

МО – муниципальное образование

СП – сельское поселение

НПУ - нормальный подпорный уровень

УГВ – уровень грунтовых вод

ВВЕДЕНИЕ

Со строительством Иркутской ГЭС и образованием Иркутского водохранилища, уровень Байкала был искусственно поднят в среднем на 80 см. Был установлен нормальный подпорный уровень (НПУ) 457 м ТО. При этом произошло затопление низких берегов площадью 500 км², а в годы наиболее высокого уровня (1962-1973 гг.) затапливалось до 750 км² [1].

По данным Б.П. Агафонова [2] береговая линия Байкала составляет 2077 км, протяженность абрадируемых берегов около 1766 км (85%). Из абрадируемых берегов 568 км приходится на интенсивно разрушаемые уступы в аккумулятивных террасах и шлейфах, 592 км – на эпизодически размываемые низкие шлейфы, подтапливаемые в годы высоких уровней озера. В северной котловине интенсивно абрадируемые шлейфы и террасы преобладают на северо-западной стороне озера, а в средней и южной котловинах - на юго-восточной стороне.

Исследованиями с помощью реперов установлено, что с 1962 г. по 1997 г. размыв и разрушение берегов в некоторых местах достиг десятков и более сотни метров: п. Максимиха – 110-120 м, п. Катково 12.5 м, п. Безымянка – 23.9 м, п. Энхалук – 14.0 - 18.5 м, п. Гремячинск – 25-40 м, с. Сухая – 52.6 м, с. Посольск – 39.7-54.0 м, п. Поворот – 60-80 м, п. Нижнеангарск – 15-22 м. [1]. Развитие абразионных процессов зависит от нескольких факторов: интенсивности волнения, геологического строения побережья, высоты подъема уровня воды, длительности стояния высокого уровня и др. Представленный отчет направлен на обоснование методики количественной оценки абразионного разрушения берегов на основе данных колебания уровня воды в Байкале и обобщения произошедших изменений побережья за длительный промежуток времени.

По проекту были подготовлены промежуточные отчеты по этапам: Рег. № НИОКТР 121112400008-2 (за 2021г.) и Рег. №. НИОКТР 121112400008-2 (за 2022г.).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Волнение у восточного берега может достигать 4.5-5.5 м. В заливах высота волн меньше, к примеру, в Баргузинском заливе волны, преимущественно, невысокие, летом около 20 см. Штормовые явления и высокие волны наблюдаются осенью, как правило, с конца сентября до ледостава. Высота волн достигает 3 м, поздней осенью сопровождается образованием наплесков и торосов высотой до 3,5 м. Период волнения совпадает с максимальным уровнем воды в Байкале.

До строительства Иркутской ГЭС Байкал за многовековой период выработал вдоль берега широкую пляжную полосу, которая является естественной защитой берегов от абразии. Пляж гасит энергию волн, которая расходуется на перемещение песчаных отложений. С подъемом уровня озера пляжи затапливаются, и волны беспрепятственно достигают уступа берегов и со всей мощью ударяют в них, производя значительные разрушения. Абразия начинает протекать на Байкале при высоте волн более 1.3 м.

Энергия волн описывается следующими уравнениями (1, 2, 3):

$$E = \rho g h^2 \lambda / 8 \quad (1)$$

$$\lambda = 0,64 v^2 \quad (2)$$

$$E = 0,08 \rho g h^2 v^2 \quad (3)$$

где: E – энергия волны
ρ – плотность воды
g – ускорение силы тяжести
h – высота волны
λ – длина волны
v – скорость

Энергия волны прямо пропорциональна квадрату высоты волны и квадрату скорости волны, которые зависят от протяженности водоема и его глубины [3]. Берега Байкала отличаются значительным разнообразием геологического строения, типов берегов и береговых форм рельефа [4, 5]. Поэтому интенсивность абразионных процессов в разных местах побережья сильно различается.

Для количественной оценки интенсивности разрушения берега Байкала необходим длительный мониторинг на наблюдательных пунктах, различающихся геологическим строением. Разрушение побережья необходимо коррелировать с уровнем воды, направлением и силой ветра, высотой волн, длительностью волнения и др. Получить такую информацию в ближайшем обозримом будущем, учитывая большую протяженность берега,

наличие многочисленных заливов, бухт и разнообразие геологического строения, не представляется возможным. Возникла необходимость разработки другого подхода, который позволил-бы проводить приблизительную оценку разрушения берегов под воздействием абразионных процессов.

Актуальность количественного изучения абразии обусловлена большим практическим значением для строительства защитных инженерных сооружений в населенных пунктах, подсчетом ущерба, наносимого угольям сельскохозяйственного назначения, землям, относящимся к лесному фонду и др.

1. Обоснование количественной оценки разрушения побережья Байкала

Для количественной оценки разрушения побережья Байкала в опубликованной литературе используется уровень стояния воды в озере. К уровню воды в озере привязаны все произошедшие разрушения береговой полосы.

Для корреляции уровня воды в озере с развитием абразионных процессов мы воспользовались данными по среднесуточным значениям уровня Байкала, которые были предоставлены В.М. Никитиным. Были построены графики изменения уровня за отдельные промежутки времени. На рисунке 1 приведен график изменения уровня Байкала в 1976-1996 гг. На этот же рисунок вынесены периоды активного разрушения берега абразионными процессами, которые установлены предшественниками [1, 6]. На графике видно, что активизация абразии происходит, когда уровень Байкала превышает отметку 457.0 м.



Рисунок 1 – Сезонные изменения уровня воды в Байкале в 1976-1996 годах и развитие абразионных процессов. Условные обозначения: 1 – линия изменения уровня, 2 –уровень Байкала выше НПУ, 3 – протекание аномальной абразии, зафиксированное в опубликованной литературе

Многими авторами в публикациях, посвященных абразии на берегах Байкала, отмечалось, что именно в эти годы, когда уровень превышал абсолютную отметку 457 м ТО происходило катастрофическое преобразование берегов Байкала [6]. Абразия, протекавшая в эти годы, и сопутствующие ей обвалы, оползни, сплывы, солифлюкция определили облик побережья, который мы наблюдаем в настоящее время. Всего за период,

прошедший после строительства плотины ГЭС на Байкале наблюдалось 18 наводнений, когда уровень превышал 457 м.

Наблюдения за изменением побережья показывают, что катастрофическое разрушение берегов происходит за короткий промежуток времени, как правило, в конце лета, начале-середине осени. В этот период времени на озере возникает сильное волнение, шторм гонит волны к берегу и они производят разрушительную работу. В таблице 1 приведены годы, когда были достигнуты максимальные уровни воды в озере.

Таблица 1 – Максимальный уровень воды в Байкале в многоводные годы

Год наводнения	1962	1963	1964	1966	1971	1973	1983	1984	1985
Максимальный уровень, м. ТО	457.27	457.13	457.25	457.01	457.11	457.37	457.07	457.18	457.29
Год наводнения	1986	1988	1990	1991	1992	1993	1994	2020	2021
Максимальный уровень, м. ТО	457.1	457.37	457.23	457.1	457.05	457.11	457.31	457.12	457.23

Из таблицы видно, что различия в уровне воды незначительны, максимальное превышение НПУ составляет всего 37 см. Тем не менее, разрушения берега, которые произошли в эти годы, значимы, хотя и различаются нанесенным ущербом. Из этого можно сделать вывод, что на интенсивность абразионных процессов оказывает влияние не уровень воды в озере, а другой фактор, который связан с уровнем воды. Наибольшее значение может иметь длительность стояния высокого уровня воды в озере. Ведь чем больше отрезок времени с высоким уровнем, тем больше вероятность, того что могут сложиться условия, благоприятствующие возникновению абразии на том или ином участке побережья. На рисунке 2 приведены графики зависимости количества дней с уровнем воды в Байкале выше 457 м от максимального уровня, которые наблюдались в многоводные годы. Основная часть кривых, представленных на рисунке, имеет субпараллельный вид, что характерно для водоемов, находящихся в естественных условиях. На значительных участках графиков наблюдается, линейная зависимость между уровнем и длительностью наводнения. Чем более длительное наводнение, тем более протяженные прямолинейные участки. Отдельные кривые имеют более крутой наклон зависимости между уровнем и длительностью стояния, что возможно связано с увеличением сброса воды через плотину. Количество дней в году, когда уровень воды был выше 457 м, изменяется от 43 до 127.

Минимальное количество дней с высоким стоянием уровня было при уровне 457.05 м, максимальное при уровне 457.37 м.

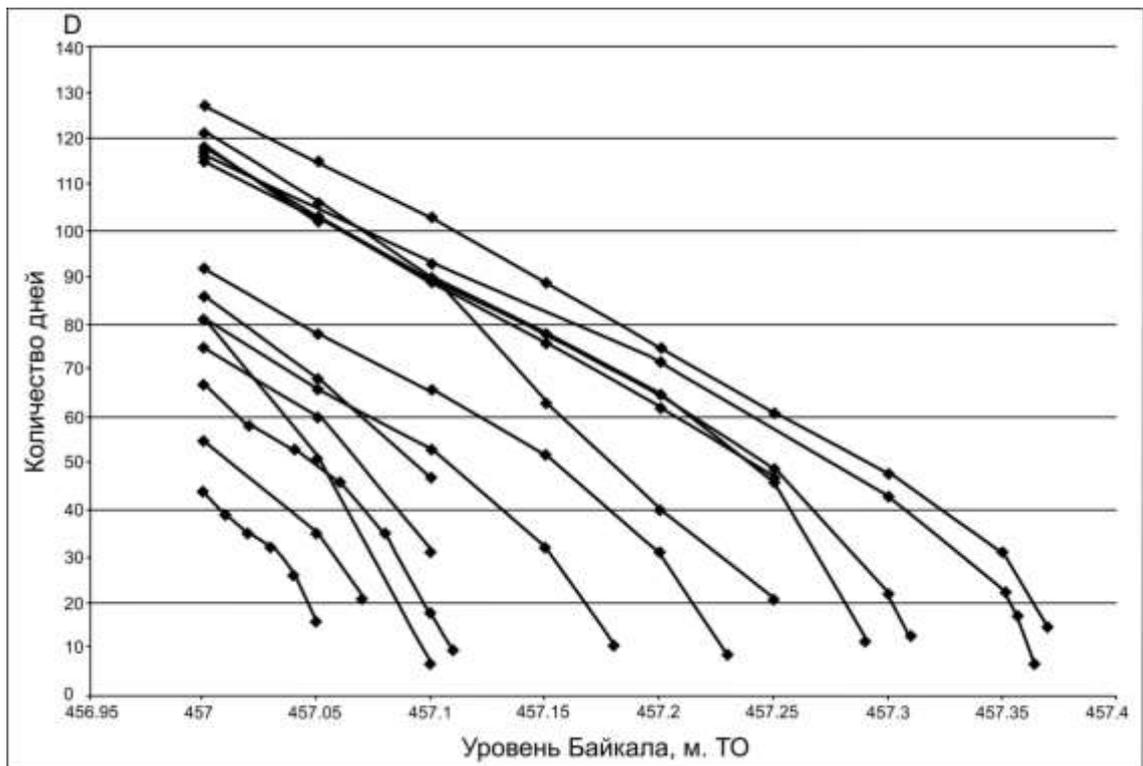


Рисунок 2 – Зависимость количества дней высокого стояния воды в Байкале от его уровня в многоводные годы

На основании этих частных кривых зависимости длительности наводнения от максимального подъема уровня воды в озере был построен обобщенный график продолжительности наводнения от максимального уровня воды в Байкале, который представлен на рисунке 3.

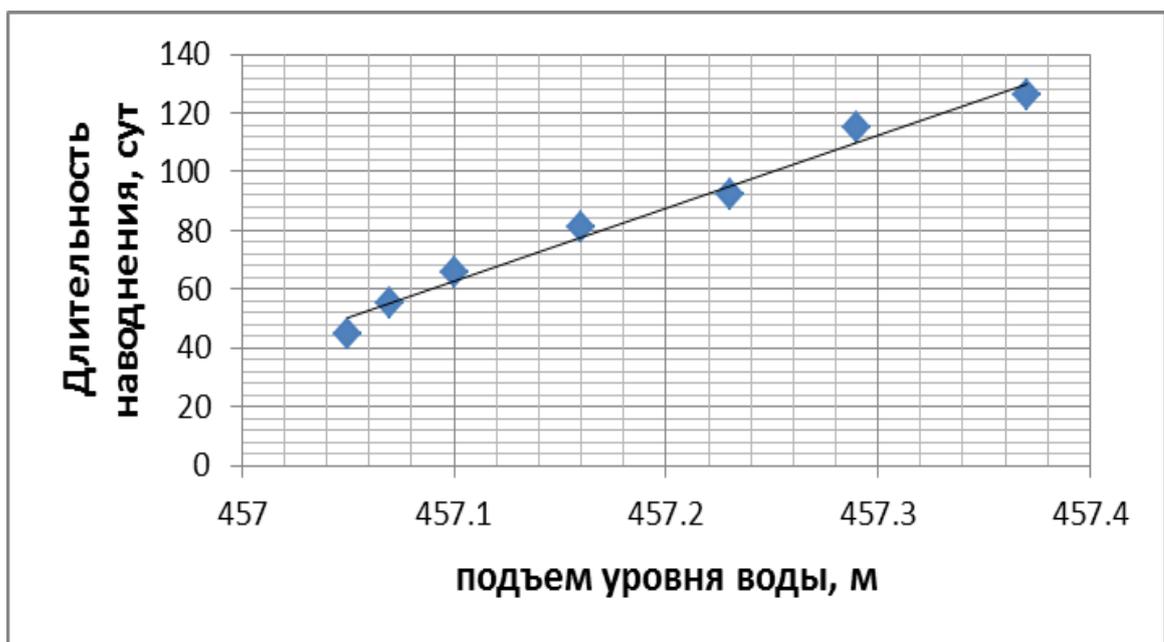


Рисунок 3 – Зависимость длительности наводнения от максимального подъема уровня воды в Байкале

Используя этот график можно определить продолжительность наводнения на Байкале, если будет известен максимальный подъем уровня воды во время этого наводнения. На основании установленной зависимости можно также сделать прогноз продолжительности наводнения для уровней, которых еще не было на Байкале.

К примеру, при максимальном уровне 457.4 м наводнение будет продолжаться 138 дней, при уровне 457.5 м – 162 дня, при уровне 457.6 – 186 дней. Это необходимо для прогноза ущерба, который может быть нанесен берегу при подъеме уровня Байкала до абсолютных отметок значительно выше наблюдаемых в настоящее время (рисунок 4).

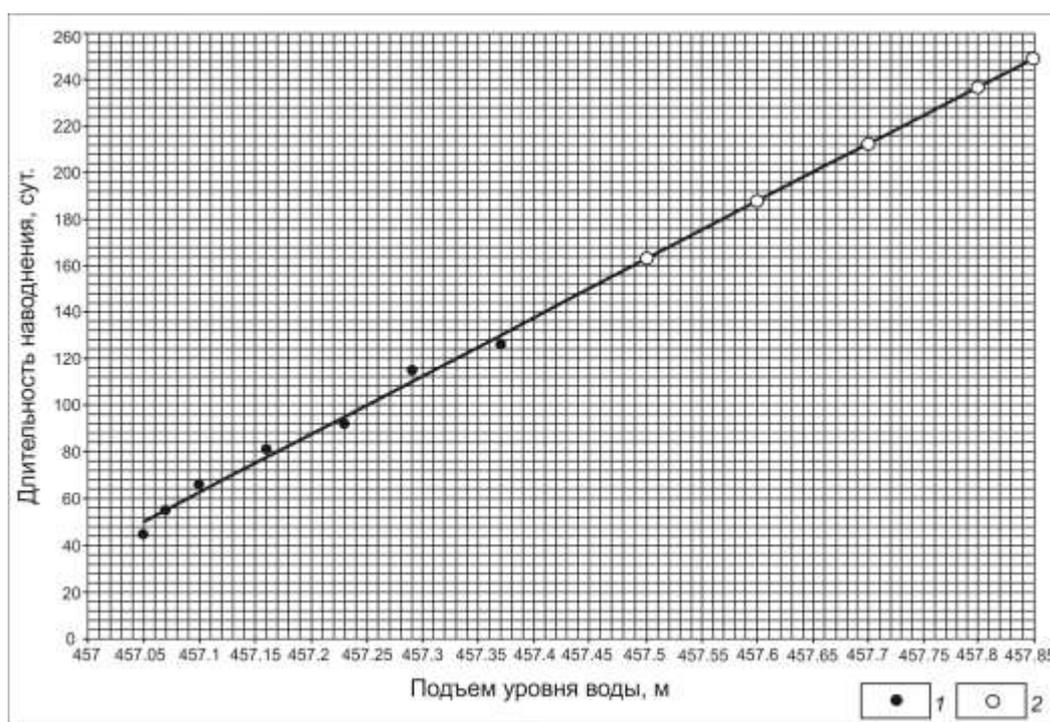


Рисунок 4 – Зависимость длительности наводнения от максимального подъема уровня с экстраполяцией значений до 457.85 м. Условные обозначения: 1 – наблюдаемые значения, 2 – значения, полученные при экстраполяции установленной зависимости в сторону предполагаемых максимальных уровней

2. Влияние геологического строения берега

Развитие абразионного процесса в значительной степени зависит от геологического строения берега. В этом плане абразионное разрушение берегов изучалось П.А. Агафоновым [2]. Он при помощи реперов наблюдал разрушение побережья Байкала в течение 6 лет, с 1969 по 1975 гг. Исследования проводились в 31 точке наблюдения на берегах Байкала сложенных различными породами. Им установлено, что ширина полосы разрушения берега зависит от геологического строения и геоморфологических условий местности. Наиболее активно размываются берега, представленные аккумулятивными шлейфами и террасами. В точках наблюдения рассчитана средняя скорость отступления берега за 6 летний период. Установлено, что усиление сноса рыхлого материала отчетливо увязываются с высокими уровнями воды в Байкале в 1971 и 1973 гг. (рисунок 5).

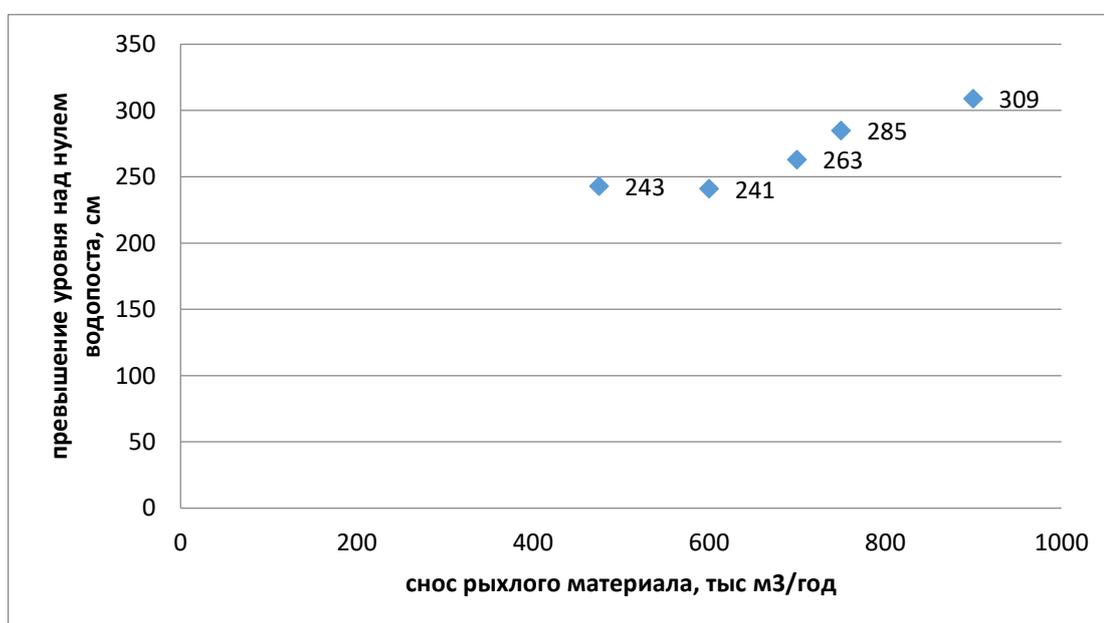


Рисунок 5 – Снос рыхлого материала с берегов в сопоставлении с уровнем воды в Байкале [2]. Примечание: НПУ соответствует 266 см над нулем графика водопоста

В маловодные годы снос рыхлого материала составлял от 475 до 600 тыс. т/год. При уровне воды соответствующему НПУ снос возрос до 700 тыс.т/год, а при уровне выше НПУ составил от 750 до 900 тыс.т/год. Приведенные данные указывают на то, что в период наводнений резко возрастает снос рыхлого материала в озеро. Но, как указывает сам автор публикации, приведенные значения необходимо рассматривать как приблизительные, так как периоды наблюдений были неравномерными, многоводные годы перекрывались маловодными. Картина сноса материала в зависимости от уровня воды в озере оказалась сглаженной, наименьшее количество абразионного материала, сносимого в озеро в маловодные годы установить не удалось. Разница между максимальным и минимальным

сносом, установленным в эксперименте, составляет 425 тыс. т/год. То есть в многоводный год снос рыхлого материала возрос почти в два раза, что и проявилось в резком размыве побережья. Произошедшие разрушения берегов в этот период были зафиксированы многими исследователями.

Снос материала с берега в маловодные годы, несомненно, происходит, но в эти годы, вероятно, определяющий вклад вносит не абразия, а другие процессы – плоскостной смыв, струйчатая эрозия, оврагообразование, солифлюкция, эоловый перенос пыли, разрушение берегов при движении льда, разрушение берегов эрозией и др.

В целом, можно заключить, что были получены интересные результаты, которые имеют научное и практическое значение. Но они являются частным случаем протекания абразионного процесса в конкретный промежуток времени. Экстраполировать эти данные на другие отрезки времени затруднительно. Если бы наблюдения продолжались десять лет, скажем с 1966 г. по 1975 г. В этот отрезок времени большая часть лет относится к маловодным, то, естественно, скорость отступления берега была бы меньше, чем установленная за шесть лет. То есть на основании полученных экспериментальных данных, представленных в таком виде, как скорость отступления в год, невозможно оценивать ущерб, наносимый абразией лесным, сельскохозяйственным землям, так как вычисленная средняя скорость отступления берега справедлива только для этого конкретного отрезка времени. Тем более на основании этих данных невозможно предсказать интенсивность абразии при другом уровне стояния воды.

Для того, чтобы избежать возникшие затруднения необходимо вычлнить главные факторы, которые определяют абразию, рассмотрим график изменения уровня Байкала, который наблюдался в 1961-1975 гг. на Байкале, и сопоставим его с интенсификацией абразии и сопутствующих ей процессов разрушения берега (рисунок б).

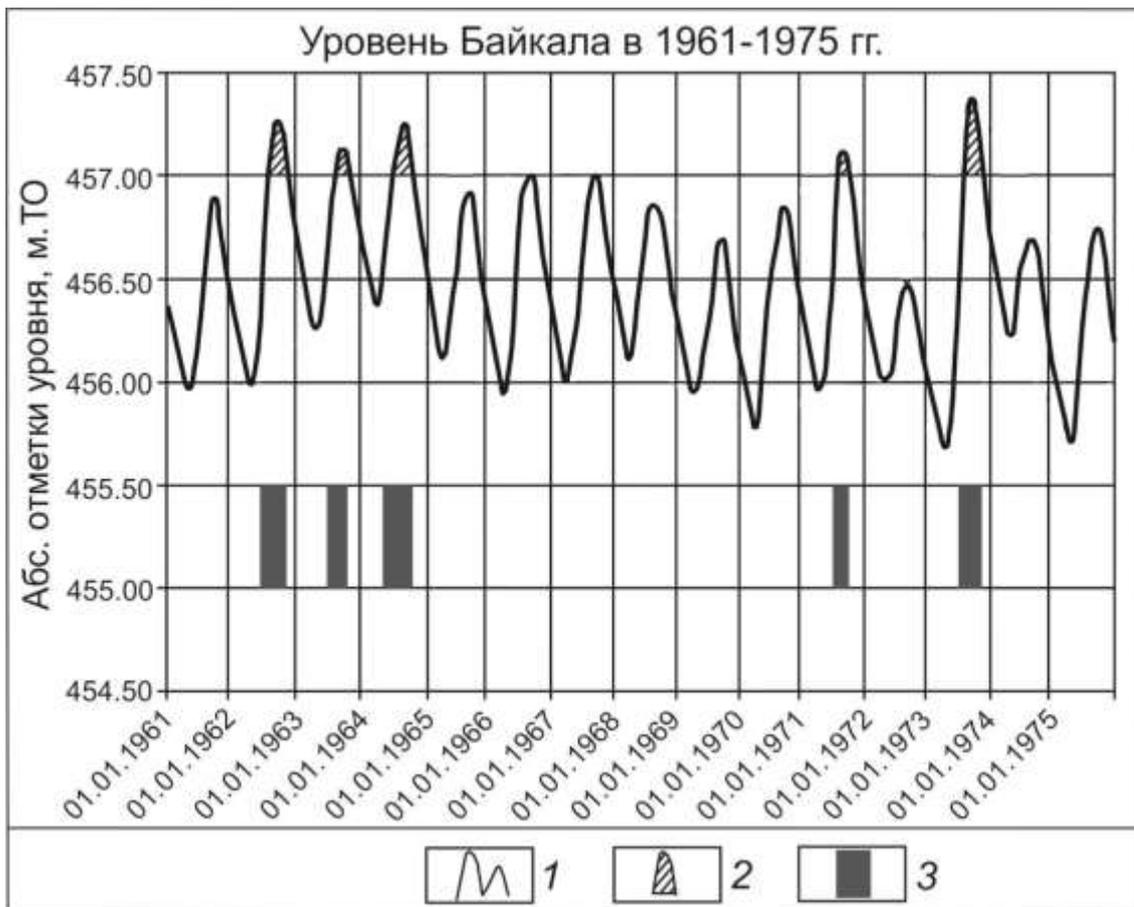


Рисунок 6 – Уровень воды в Байкале в 1961-1975 гг и интенсивность разрушения берегов. Условные обозначения: 1 – линия изменения уровня, 2 –уровень Байкала выше 457 м, 3 – протекание аномальной абразии, зафиксированное в опубликованной литературе

За этот промежуток времени интенсивное разрушение берега происходило пять раз [1]. Как мы уже выяснили, абразия интенсифицируется, когда уровень Байкала превышает 457 м, а при более низких отметках ее воздействие на берег минимальное. Как мы уже сказали, в этом случае разрушение берегов протекает без ее участия и абразию условно можно считать «нулевой». Конечно, в каких-то конкретных местах могут создаваться условия для ее протекания, но в целом на побережье происходит затухание абразии, энергия волн расходуется на перенос и отложение осадков.

При достижении уровня 457 м ТО, сформировавшиеся вдоль берега за длительный промежуток времени аккумулятивные формы подводного рельефа, уже не тормозят волны, и они начинают разрушать берег. Определяющим фактором интенсификации абразии выступает не абсолютная отметка уровня воды, а длительность стояния уровня выше 457 м. Это связано с тем, что для возникновения абразии кроме высокого уровня воды необходимо, чтобы в озере начали образовываться волны высотой более 1.3 м. Возникновение волнения на озере носит вероятностный характер, и чем длительнее стояние

высокого уровня в озере, тем больше вероятность возникновения волн, которые смогут разрушить берег.

Рассмотрим, как изменялся уровень Байкала за шесть лет, когда проводился эксперимент В.П. Агафоновым. За этот промежуток времени уровень Байкала превышал 457 м два раза – в 1971 г. и 1973 г. То есть разрушение берега, которое отмечено в эксперименте, произошло за эти два года, а не за шесть лет. Более того оно произошло за время, когда держался уровень воды выше 457 м. На рисунке 7 приведен график изменения уровня воды в Байкале в 1971 г.

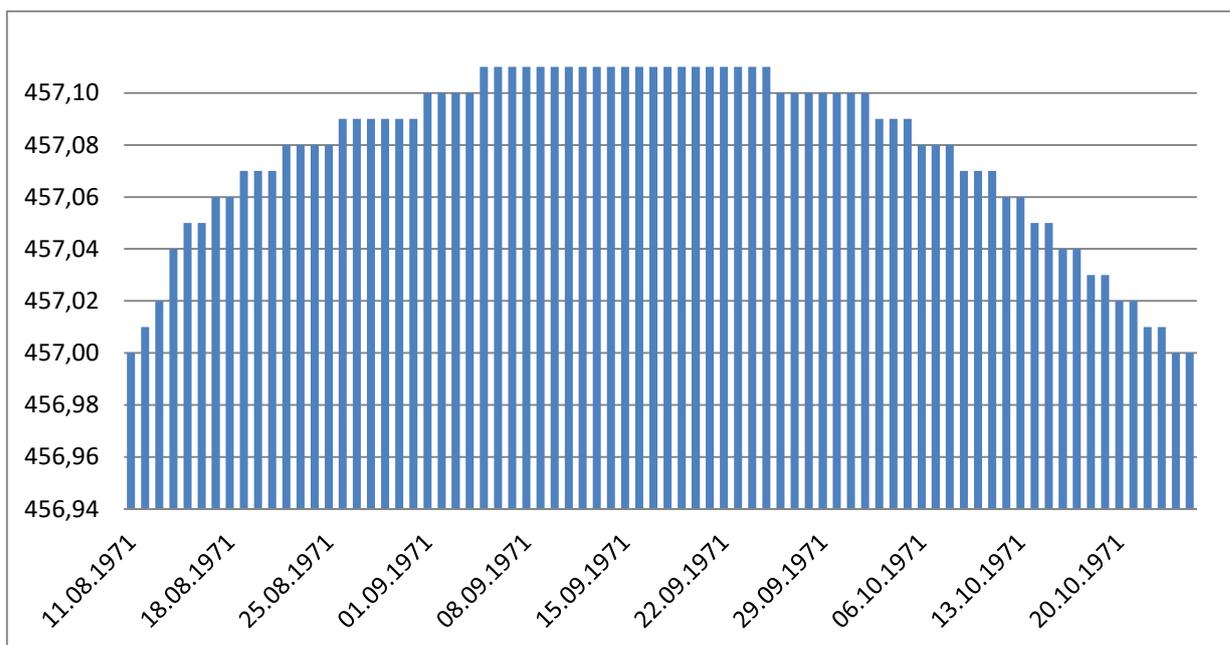


Рисунок 7 – Гистограмма уровня стояния воды в Байкале в 1971 г.

В 1971 г. уровень 457 м был достигнут 11 августа и держался выше этой отметки до 25 октября (75 дней). Максимальный уровень достиг значений 457,11 м и держался 20 дней. В 1973 году уровень 457 м был достигнут 14 августа и держался выше этой отметки до 07 декабря (115 дней). Максимальный уровень достиг значений 457,37 и держался 8 дней (рисунок 8).

Основной вклад в абразионное разрушение побережья внесло волнение на озере в 1971 г. – в течение 75 суток, а в 1973 г. – в течение 115 суток. Суммарно абразия активно протекала в течение 190 суток. Таким образом, можно заключить, что абразионное разрушение берегов, установленное Б.П. Агафоновым, произошло за 190 суток, а не за 6 лет. На основании этих данных рассчитаем скорость отступления берега в точках наблюдения за сутки и, затем, абразионное разрушение берегов в 1971 г. и 1973 г. (таблицы 2 и 3).

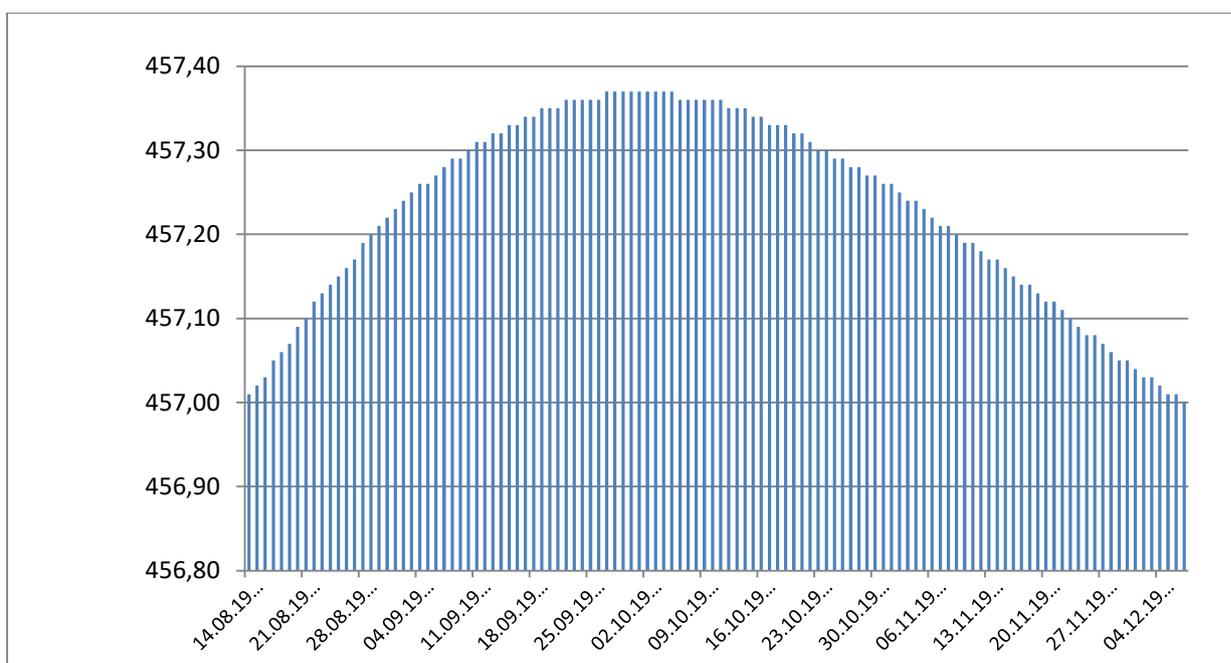


Рисунок 8 – Гистограмма уровня стояния воды в Байкале в 1973 г.

Таблица 2 – Отступление береговых абразионных уступов на юго-восточном побережье оз. Байкал за 1969-1975 гг.

Местоположение	Скорость отступления, см/год (Агафонов, 1990)	Отступление за 6 лет, см (Агафонов, 1990)	Скорость отступления, см/сут	Отступление берега за 1971 год (см)	Отступление берега за 1973 год (см)	Отступление берега за 2 многолетних года, см
п. Клюевка	105.7	634	3.34	$3.34 \times 75 = 250$	$3.34 \times 115 = 384$	634
п. Малая Езовка	64.5	387	2.04	153	235	388
м. Облом	1	6	0.03	2.25	3.45	5.7
Усквозной долины к оз. Котокельскому	2.8 68	16.8 408	0.09 2.15	6.75 161	10.35 247	17.1 408
о. Лиственичный	22.6	135.6	0.71	53	82	135
губа Каткова	2.5 18	15 108	0.08 0.57	6 42.7	9 65.6	15 108
м. Горевой Утес	8.9	53.4	0.28	21	32	53
южнее мыса Горевой Утес	23 2.4	138 14.4	0.73 0.07	55 5.2	84 8.0	139 13
м. Нижнее Изголовье	4	24	0.13	9.7	14.9	25
У р. Шумилихи	21.5	129	0.68	51	78	129
У р. Шегнанды	9	54	0.28	21	32	53
Губа Амнундакан	14.5 18	87 108	0.46 0.57	34.5 42.7	52.9 65.5	87 108
Губа Ая	9.5 5.2	57 31.2	0.3 0.16	22.5 12	34.5 18.4	57 30

Таблица 3 – Отступление береговых абразионных уступов на северо-западном побережье оз. Байкал за 1969-1975 гг.

Местоположение	Скорость отступления, см/год (Агафонов, 1990)	Отступление за 6 лет, см (Агафонов, 1990)	Скорость отступления, см/сут	Отступление берега за 1971 год (см)	Отступление берега за 1973 год (см)	Отступление берега за 2 многоводных года, см
У п. Нижнеангарск	19.2 18.7	115 112	0.6 0.6	45 45	69 69	114 114
южнее р. Тьи	19	114	0.6	45	69	114
м. Большой Черемшаный	1.2	7.2	0.04	2.8	4.6	7
м. Средний Кедровый	5	30	0.16	12	18,4	30
В б. Заворотной	6.1	36.6	0.19	14,3	21,9	36
У м. Саган-Морян	0.4	2.4	0.01	0,75	1,15	2
У р. Шартлы	3.9 7.5	23.4 45	0.12 0.24	0,6 18	14 28	15 46
Севернее пади Узур	11	66	0.35	26,3	40,3	67
м. Шинтуй-Хушун (Ольхон)	4.8	29	0.15	11,3	17,3	29
м. Ухан (Ольхон)	8.8	53	0.28	21	32	53
м. Саса (Ольхон)	40	240	1.26	95	145	240
б. Баян-Шунгей (Ольхон)	1.3	7.8	0.04	2.8	4.6	7
Около пади Курте	5	30	0.16	12	18	30
Около б. Песчаной	8.8 15.6	53 94	0.28 0.49	21 36,8	32 56,4	53 93
Падь Озерко	18.5 11.8	111 71	0.58 0.37	44 27,8	67 42,6	111 70
Южнее п. Большие Коты	17	102	0.54	41	62	103
б. Зобушка	10.8	64.8	0.34	25.6	39	65

На основании выявленных закономерностей можно рассчитать интенсивность абразионных процессов при разных уровнях воды в Байкале по формуле (4):

$$A = k * D \quad (4)$$

где: A – абразия за многоводный период года, см

k – скорость отступления берега в точке наблюдения, см/сут.

D – длительность многоводного периода (уровень выше 457 м), сут.

Коэффициент k характеризует геолого-геоморфологические условия побережья, его можно взять из таблиц 2,3 или из других источников, где проводился мониторинг. Для приближенной оценки абразии в местности с неизвестным значением k можно использовать метод аналогий. Значения этого показателя принимать на основании сопоставления геологических условий и состава пород по имеющимся геолого-геоморфологическим картам. Значение D определяется по графику, представленному на рисунке 2. Максимальный уровень воды в наводнения можно взять также из таблицы 1. Методика позволяет рассчитать уничтожение береговой полосы, которое произошло в прошлом и сделать прогноз разрушений в будущем при разных уровнях воды в Байкале.

3. Проверка достоверности методики

Для проверки достоверности методики расчета рассмотрим разрушение берега абразией, произошедшее в 2020-2021 гг. В эти годы наблюдался подъем уровня выше НПУ. В результате абразии нанесен большой ущерб побережью: пострадали населенные пункты, объекты рекреации, линейные инженерные сооружения, земли лесного фонда и сельскохозяйственного назначения.

На рисунке 9 приведена гистограмма уровня Байкала в многоводный период 2020 г. Гистограмма имеет ассиметричный вид, что связано с техногенным регулированием уровня воды за счет интенсивного сброса через плотину. Имеющаяся гидрологическая информация ограничивается 49 днями стояния высокого уровня.

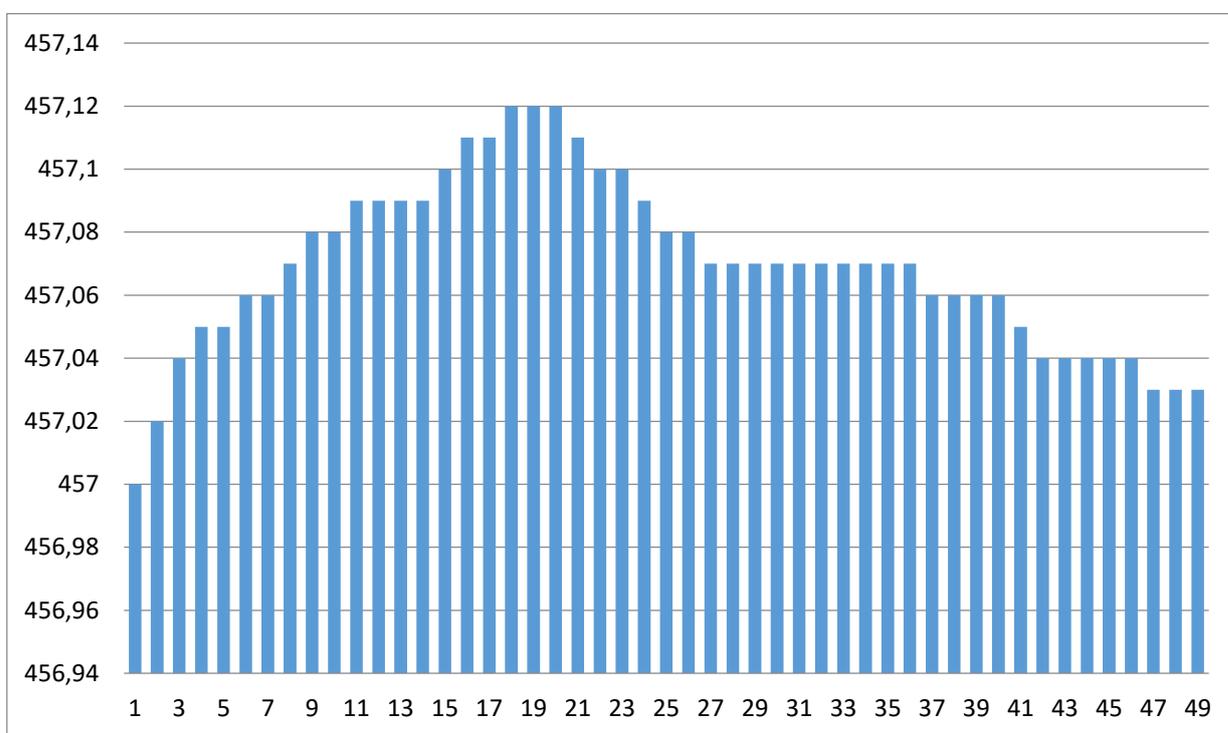


Рисунок 9 – Гистограмма уровня стояния воды в Байкале в 2020 г.

Максимальный уровень достиг значений 457.12, держался 3 дня. Для расчета абразии необходимо установить период высокого стояния уровня воды в Байкале. Воспользуемся графиком зависимости между уровнем и длительности многоводного периода, который представлен на рисунке 4. Длительность многоводного периода составляет 68 дней.

На рисунке 10 представлена гистограмма уровня Байкала в 2021 г. Она также имеет ассиметричный вид за счет интенсивного спуска воды через плотину. В нашем

распоряжении имеется информация уровня стояния воды только до 31 октября, когда уровень еще не достиг НПУ, поэтому воспользуемся графиком, приведенном на рисунке 4.

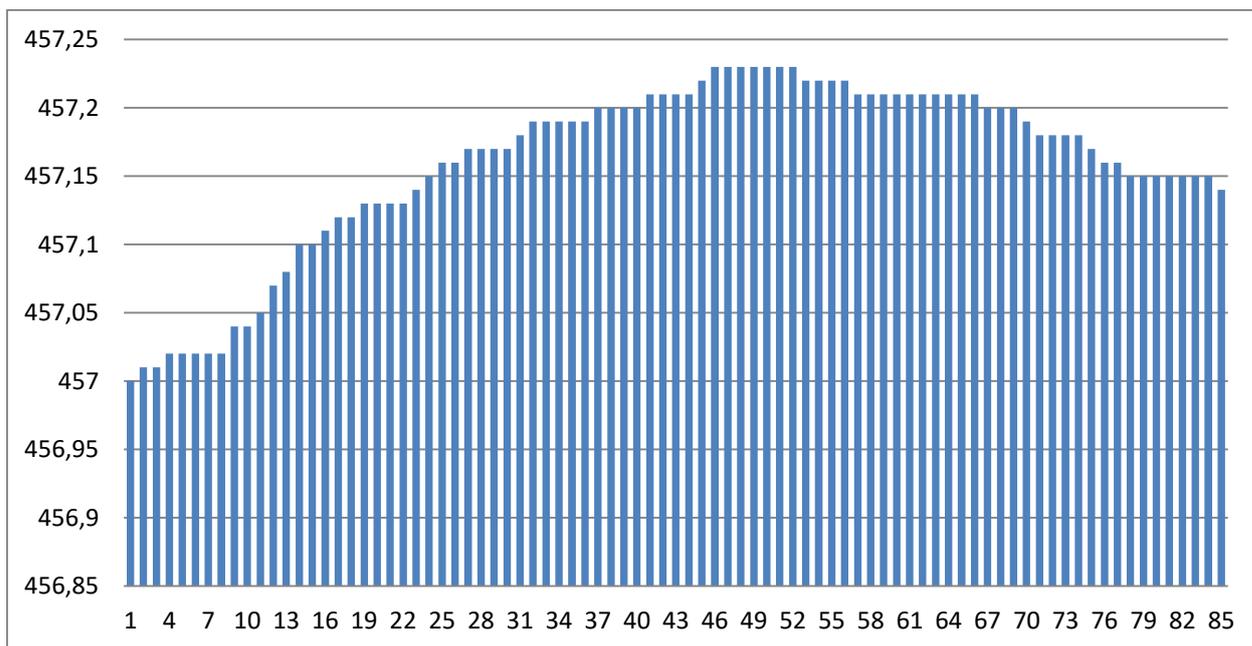


Рисунок 10 – Гистограмма уровня Байкала в 2021 г.

В 2021 г максимальный уровень был на отметке 457.23 м, соответственно продолжительность многоводного периода составляет 92 дня.

На основании полученной информации была рассчитана абразия на ключевых участках побережья, где были проведены рекогносцировочные работы в полевой период 2022 г (таблица 4). Обследование берега проводилось в июле 2022 г. На участке в районе п. Ключевка ранее берег был укреплен защитными сооружениями типа бун и волноломов. На укрепленных бунами участках абразионное разрушение берега произошло на отдельных участках. Ширина уничтоженного абразией берега составляет 1.5-2.0 м.

В этих местах в основании террасы лежат песчаные отложения с почвой (рисунок 11). Между террасой и берегом сформирован широкий пляж, сложенный галькой. Там, где инженерных сооружений для защиты не было, произошло значительное разрушение берега.

Таблица 4 – Разрушение берега на участках подверженных интенсивной абразии в 2020 г. и 2021 г.

Местоположение точки наблюдения	Скорость отступления, см/сут	Отступление берега за 2020 год (см)	Отступление берега за 2021 год (см)	Отступление берега за 2 многолетних года, см
п. Ключевка	3.34	3.34x68=227	3.34x92=307	534
п.Малая Езовка	2.04	139	188	327
У сквозной долины к оз. Котокельскому	2.15	146	198	344
о. Лиственичный	0.71	48	65	113
губа Каткова	0.57	39	52.4	91
южнее мыса Горевой Утес	0.73	50	67	117
У р. Шумилихи	0.68	46	63	109
п.Нижнеангарск	0.6	41	55	96
южнее р. Тыи	0.6	41	55	96



Рисунок 11 – Участок берега Байкала, защищенный инженерными сооружениями, в районе п. Ключевка

Абразия сопровождалась оползнями, на побережье наблюдаются вывалы леса. Высокая пятиметровая терраса подмыта волнами, наблюдается сползание почв вместе с деревьями на пляж. Ширина разрушенного берега с вывалами леса составляет 3-4 м (рисунок 12). Протяженность этого участка берега, разрушенного абразией, составляет 500 м.



Рисунок 12 – Обрушение берега в районе п. Клюевка с вывалом березового леса

Абразионное разрушение берега в губе Каткова развивалось на большом протяжении. Абразионная терраса во многих местах располагается в 4-5 м от полотна автомобильной дороги (рисунок 13).



Рисунок 13 – Абразионное разрушение высокой террасы, затронувшее насыпь автомобильной дороги

Суммарно длина автомобильной дороги подвергающейся абразии составляет более 2.0 км. Размыв берега на этом участке за 2020-2021 гг. в отдельных местах достигает 3-4 м. В этих местах образовались воронки вымывания, вплотную приблизившиеся к автомобильной дороге Улан-Удэ-Усть-Баргузин. В результате воздействия волн на всем побережье губы сформировалась абразионная терраса высотой 1-2 м. Размыв берега, вероятно, происходил не только под воздействием абразии, но и в результате эрозии движущимися потоками воды, которые формировались при стекании воды с верхних частей берега, куда происходило заплескивание волн. В результате произошло вымывание берега в виде многочисленных воронок. Вследствие этого береговая полоса на этом отрезке представляет собой ломанную линию с разной степенью размыва слагающих ее осадочных отложений (рисунок 14). При обследовании выявлены многочисленные места абразионного разрушения насыпи автомобильной дороги.



Рисунок 14 – Абразионная терраса в губе Каткова

Произошел размыв берега в районе мысовых тоннелей, который угрожает автомобильной дороге Северобайкальск – Нижнеангарск. Образовался абразионный уступ высотой 1 м, сложенный галькой. Обследование этого участка берега показало, что абразии подвержен берег протяженностью 200 м, расстояние от уреза воды до автомобильной дороги 10 м.

Северо-западное побережье Байкала, расположенное южнее устья р. Тыи подверглось интенсивному разрушению в результате протекания абразионных процессов.

Урез воды располагается в 2-3 м от уступа террасы, сложенной хорошо размываемыми озерными и эоловыми отложениями. В результате абразии уничтожено 1-1.5 м берега заросшего хвойными породами деревьев (рисунок 15).



Рисунок 15 – Абразионная терраса южнее детского лагеря «Радуга» (Северобайкальский район)

Исследования абразии, проведенные на некоторых участках берега Байкала, показали, что расчеты, основанные на предложенной методике определения интенсивности протекания абразионного процесса, подтверждаются полевыми обследованиями.

4. Сравнение с результатами государственного мониторинга

На территории восточного побережья Байкала ведется государственный инструментальный мониторинг состояния берега в нескольких точках наблюдения. В качестве инструментов наблюдения используются эккер и рулетка. Отчеты по мониторингу приведены в виде таблиц, в которых результаты изменения положения береговой линии представлены в метрах. В отчетах, также приводится причина изменения, последствия и потенциальная опасность изменения границы берега. В результате проведения мониторинга установлено, что положение береговой линии меняется в значительном диапазоне. В маловодные годы наблюдается отступление границы водной поверхности от берега, в многоводные годы - наступление озера на берег.

На рисунках 16-18 представлены положения береговой линии в 2018-2022 гг. Просматривается положительная динамика изменения береговой линии под воздействием абразии в многоводные 2020-2021 гг. В эти годы абразия фиксируется во многих точках наблюдения.

Причем в первый многоводный год уничтожение берега зафиксировано в 11 точках наблюдения, во второй год – в 8 точках наблюдения. Но интенсивность проявления абразионных процессов в 2021 г. выше. Наибольшему разрушению берег подвергся в с. Гремячинск – 5.8 м, с. Новый Энхалук – 5.1 м, с. Танхой – 1.5 м, о. Ярки – 1.3 м.

В 2022 г. наблюдается интенсивная аккумуляция осадков во многих местах восточного побережья Байкала. Наиболее значимы отложения зафиксированы на побережье в районе п. Усть-Баргузин – 11.7 м, м. Новый Энхалук – 6.1 м, с. Боярский – 6 м, с. Ключевка – 6.7 м, с. Посольское – 7.2 м.

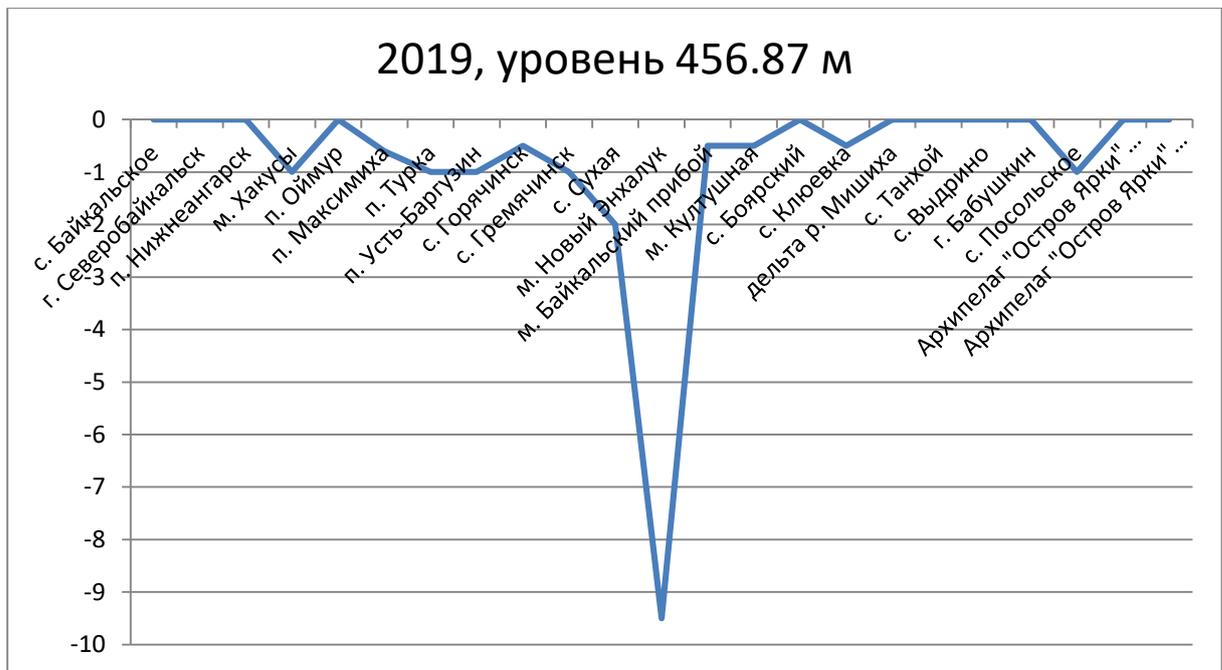
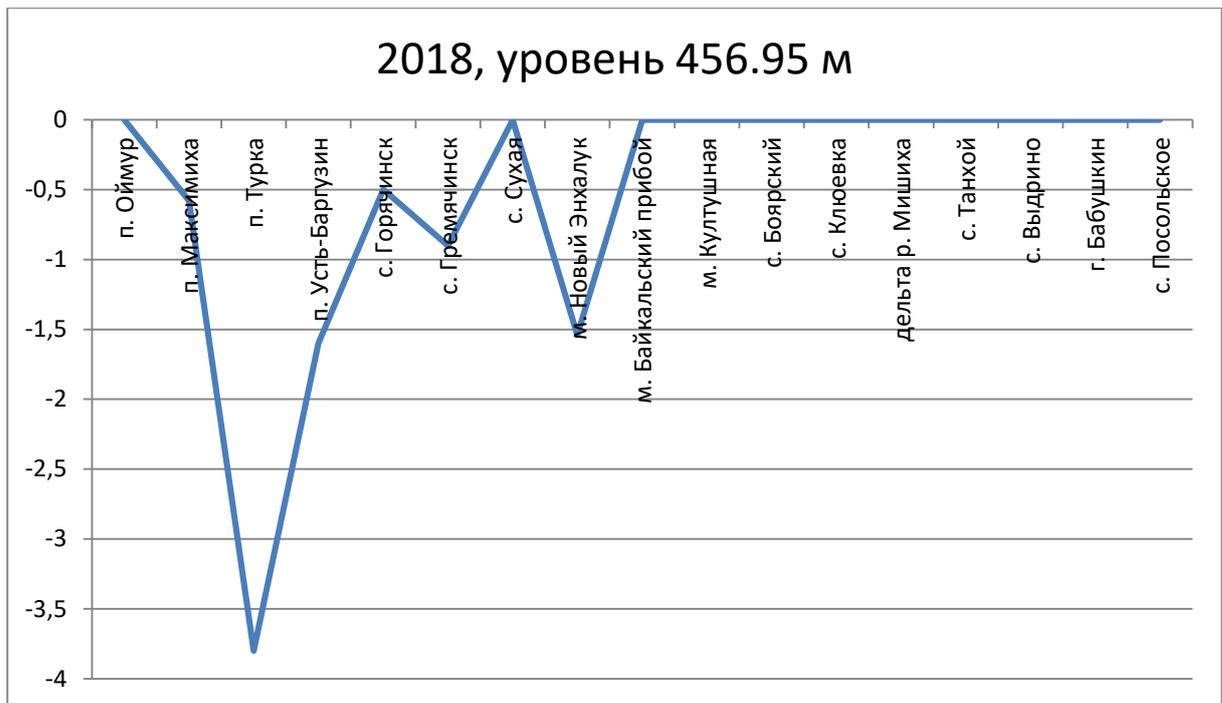


Рисунок 16 – Графики изменения положения береговой линии в точках наблюдения государственного мониторинга в 2018-2019 гг., Δx, м

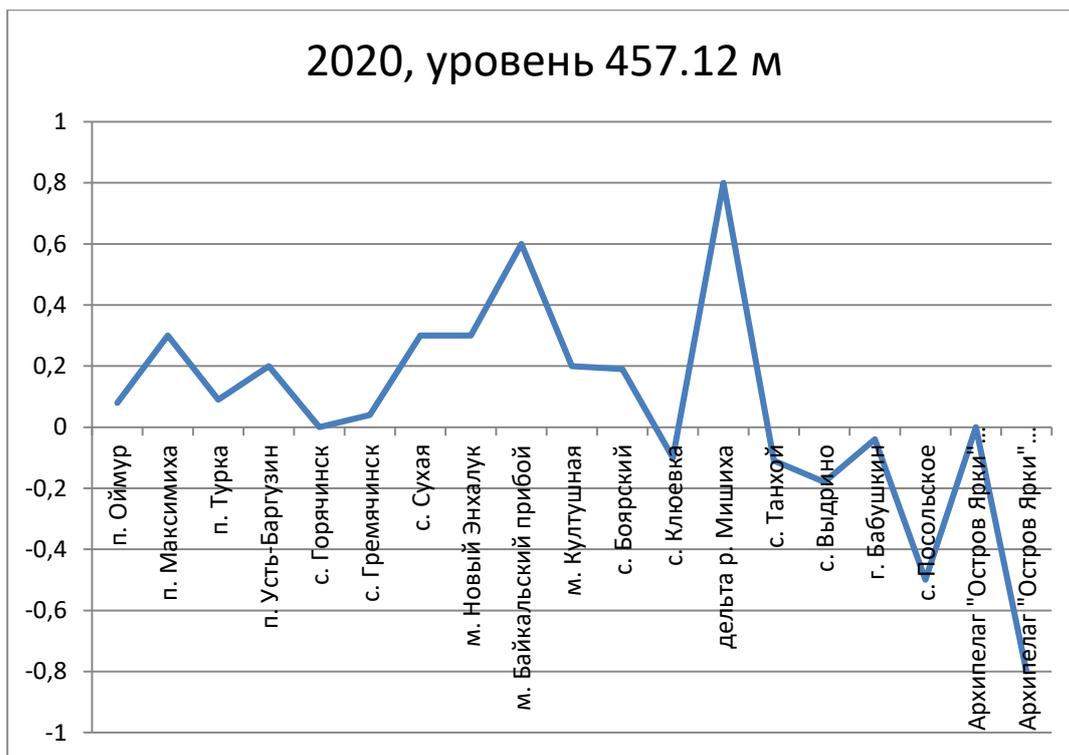


Рисунок 17 – Графики изменения положения береговой линии в точках наблюдения государственного мониторинга в 2020-2021 гг., Дх, м

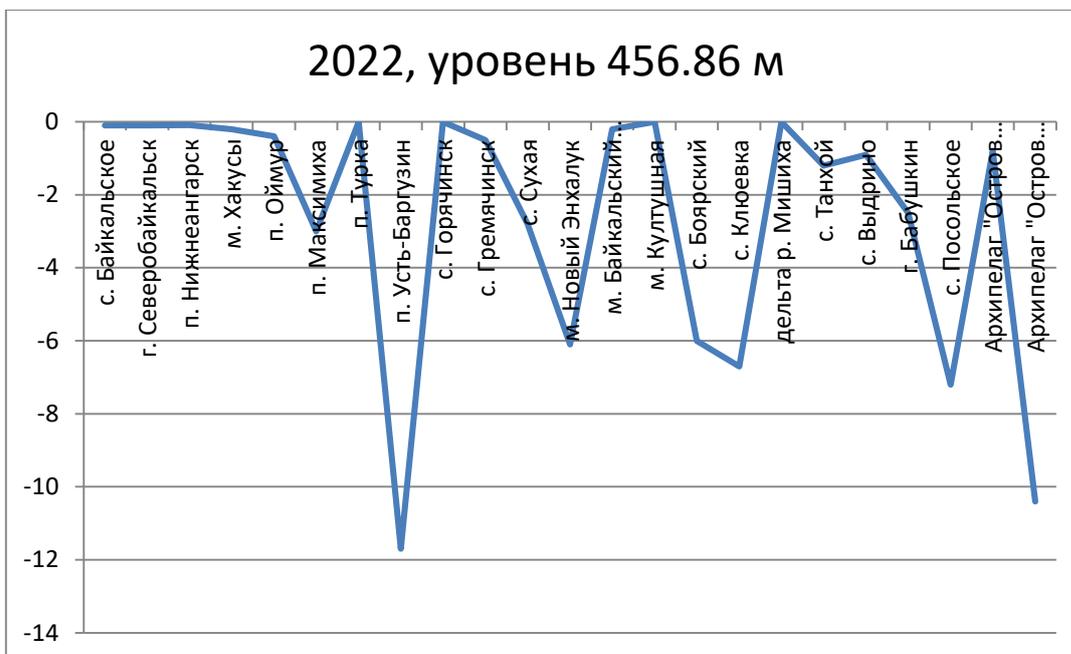


Рисунок 18 – График изменения положения береговой линии в точках наблюдения государственного мониторинга в 2022 г., Dx, м

Аккумуляция осадков в точках наблюдения государственной сети мониторинга наблюдалась и в маловодные 2018 г. и 2019 г. (см. рисунок 16). Это, вероятно, связано с многократным переотложением осадков, находящихся в прибрежной акватории озера. Они переносятся вдольбереговыми течениями и отлагаются при уменьшении скорости движения воды.

Результаты мониторинга в целом подтверждают полученные результаты интенсивности абразии, полученные методом расчета. Абразионные разрушения берега, произошедшие в 2021 г., были более разрушительными, чем в 2020 г., так как продолжительность многоводного периода была больше. Таким образом, произошедшие разрушения побережья, зафиксированные мониторингом сопоставимы с прогнозными оценками.

5. Прогноз развития абразии в многоводные годы

На основании выявленных закономерностей протекания абразии на побережье Байкала появилась возможность дать прогноз разрушения берега при различной интенсивности наводнения. Результаты расчетов по разработанной методике оценки интенсивности абразии приведены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 – Интенсивность абразии в точках наблюдения, расположенных на юго-восточном берегу оз. Байкал, при прогнозируемых максимальных уровнях стояния воды, см/год

Номер на схеме	Расположение точки наблюдения	Максимальный уровень Байкала, м ТО					
		457.4	457.5	457.6	457.7	457.8	457.85
1	п. Малая Езовка	281	335	392	432	481	510
2	п. Ключевка	461	548	641	708	788	835
3	м. Облом	4,1	4,9	5,8	6,4	7,1	8
4	У оз. Котокельское	12	15	17	19	21	23
		297	353	413	456	507	538
5	о. Лиственичный	98	116	136	150	168	178
6	губа Каткова	11	13	15	17	19	20
		79	93	109	121	134	143
7	южнее мыса Горевой Утес	100	120	140	155	172	183
		10	11	13	15	16	18
8	м. Горевой Утес	39	46	54	59	66	70
9	м. Нижнее Изголовье	18	21	25	28	31	33
10	У р. Шумилихи	94	111	131	144	160	170
11	У р. Шегнанды	39	46	54	59	66	70
12	Губа Амнундакан	63	75	88	97	109	115
		79	93	109	121	134	143
13	Губа Ая	41	49	58	64	71	75
		22	26	31	34	38	40

Результаты расчетов показывают, что подъем уровня воды в Байкале до отметок выше наблюдаемых приведет к значительному разрушению берегов и во многих местах может привести к катастрофическим последствиям. В районе Ключевки подъем уровня до 457.5 м приведет за один год к разрушению высокой террасы на 5.48 м, что, несомненно, спровоцирует оползни. Со склонов могут сойти большие блоки пород на протяжении нескольких сот метров, что нарушит безопасность движения по железной дороге.

На участке автомобильной дороги в губе Каткова при уровне воды 457.5 м за год абразия может уничтожить 93 см берега. С учетом накладывания на абразию процессов эрозионного разрушения пород, которые наблюдались здесь в 2020-2021 гг может разрушиться автомобильная дорога.

Таблица 6 – Интенсивность абразии в точках наблюдения, расположенных на северо-западном берегу Байкала, при прогнозируемых максимальных уровнях стояния воды, см/год

Номер на схеме	Расположение точки наблюдения	Максимальный уровень Байкала, м ТО					
		457.4	457.5	457.6	457.7	457.8	457.85
14	п. Нижнеангарск	83	98	115	127	142	150
15	южнее р. Тыи	83	98	115	127	142	150
16	м.Большой Черемшаный	5	7	8	8	9	10
17	м.Средний Кедровый	22	26	31	34	38	40
18	В б. Заворотной	26	31	36	40	45	48
19	У м. Саган-Морян	1,4	1,6	1,9	2,1	2,4	3
20	У р. Шартлы	17 33	20 39	23 46	25 51	28 57	30 60
21	м. Шинтуй-Хушун (Ольхон)	21	25	29	32	35	38
22	Севернее пади Узур	48	57	67	74	83	88
23	м. Саса (Ольхон)	174	207	242	267	297	315
24	б. Баян-Шунгей (Ольхон)	5,5	6,6	7,7	8,5	9,4	10
25	м. Ухан (Ольхон)	39	46	54	59	66	70
26	Около пади Курте	22	26	31	34	38	40
27	Около б. Песчаной	39 68	46 80	54 94	59 104	66 116	70 123
28	Падь Озерко	80 51	95 60	111 71	123 78	137 87	145 93
29	Южнее п. Большие Коты	74	89	104	114	127	135
30	б. Зобушка	47	56	65	72	80	85

В районе п. Нижнеангарск абразия может разрушить 98 см берега, что создаст опасность движению по автомобильной дороге, которая находится в 10 м от уреза воды.

Если уровень воды в оз. Байкал будет поднят до 457.85 м, то абразия на этих участках возрастет в 1.5 раза, что приведет к многократному возрастанию опасностей в этих местах. Уже сейчас можно говорить о необходимости строительства инженерных берегозащитных сооружений во многих обследованных местах побережья Байкала.

Прогноз разрушения берега можно делать не только в точках наблюдения, где экспериментально изучена скорость разрушения берега, но и на окружающей территории.

Для этого необходимо использовать карту геолого-геоморфологического строения территории. Точность прогноза будет зависеть от масштаба используемых карт.

На рисунке 19 приведена схема развития процессов, протекающих на берегу и в акватории озера. На схему вынесены точки, где был проведен мониторинг протекания абразии и масштаб карты.

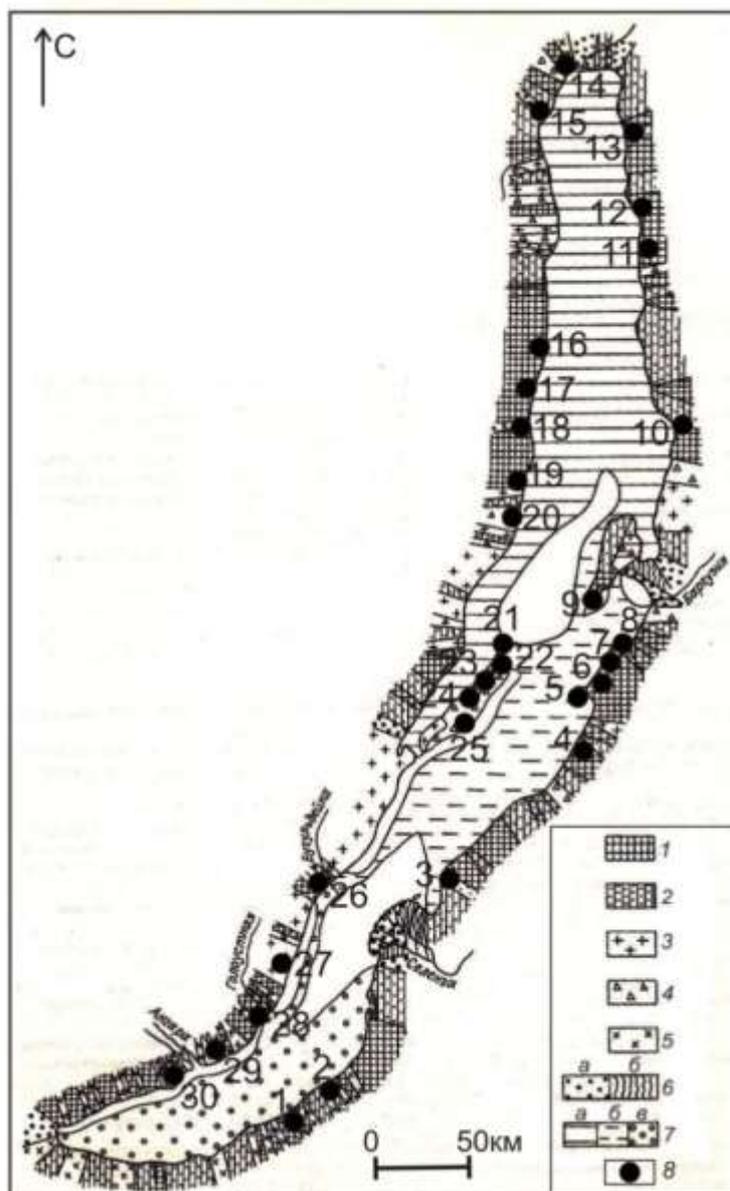


Рисунок 19 – Схема преобладающих процессов развития берегов оз. Байкал [2] с дополнениями авторов. Условные обозначения: 1 – отступление интенсивно абрадируемых уступов в аккумулятивных шлейфах и террасах; 2- эпизодический размыв низких аккумулятивных шлейфов в годы высоких уровней воды в озере; 3 – абразия скальных обрывов и коренных пород в основаниях склонов; 4- размыв рыхлого покрова в основаниях склонов; 5 – техногенно-укрепленные участки интенсивно абрадируемых уступов в шлейфах и террасах; 6 – аккумуляция: а – терригенная, б – биогенная; 7 – ареалы возможного накопления продуктов разрушения берегов на дне Байкала со среднегодовой скоростью (мкм/год): а – 19,3, б – 17, в – 72; 8 – точки проведения мониторинга

На основании этой схемы (см. рисунок 19) можно сделать прогноз интенсивности разрушения берега на территории, где не проводился мониторинг абразии. Наиболее уязвимы для абразии берега, представленные аккумулятивными шлейфами и террасами. Они занимают значительную часть побережья. Протяженность таких берегов составляет несколько сот километров. В юго-восточной части более двух сотен километров таких берегов обжиты населением, построены жилые и другие инженерные сооружения, используются для сельскохозяйственного производства. В северо-западной части побережья Байкала около ста пятидесяти километров побережья занято сосновым лесом. Лесные массивы располагаются в 1.5-2 м от уреза воды, и, естественно, будут уничтожены абразией в полосе 1.5-2 м.

6. Подтопление восточного побережья Байкала

Подтопление на побережье оз. Байкал было активизировано в середине прошлого века в связи с изменением уровня стояния воды плотиной Иркутской ГЭС в 1959 г [1]. До поднятия уровня Байкала грунтовые воды в приустьевой части рек, на Баргузин-Чивыркуйском перешейке и других равнинных местах залегали на небольшой глубине, уклон зеркала составлял в среднем 0.003-0.004. После подпора подземных вод произошло заболачивание низких мест побережья на площади свыше 500 км². Особенно велики были площади затопления в дельтах рек - Селенга (350 км²), Верхняя Ангара (120 км²). Ширина затопления первой байкальской террасы в районе р. Култушной составило 1000 м, р. Снежной - 750 м, р. Утулик – 50 м. Полоса побережья, где в той или иной мере проявился подпор подземных вод, составил 5-7 км [7].

Предпосылки для развития подтопления в связи с сезонными и годовыми изменениями уровня Байкала имеются на многих участках восточного побережья, в том числе и в населенных пунктах. Они связаны с тем, что геологические условия, определяющие движение подземных вод на восточном побережье, во многом определяются широким распространением рифтогенных разрывных нарушений [8]. В связи с тем, что на территории господствуют процессы растяжения, многие разломы открыты для проникновения поверхностных вод, и служат своеобразными каналами, по которым происходит перетекание подземных вод [9; 10; 11]. Вторая причина развития подтопления на побережье Байкала связана с тектоническими особенностями строения. Территория побережья разбита на множество блоков, отдельные блоки пород под воздействием глубинных тектонических процессов могут погружаться или вздыматься. Вследствие этого на восточном побережье Байкала сформирован расчлененный рельеф, здесь существует большое количество мелких впадин и возвышенностей. Особенно ярко выражено мелкоблоковое строение поверхности в переходных зонах от положительных морфоструктур к отрицательным [8]. Размеры блоков могут быть небольшими от 2.5×1.2 км до 9×6.5 км [4]. В микровпадинах аккумулируется влага, стекающая с окружающих возвышенностей. Сток подземных вод из впадин в озеро часто затруднен, в связи с близким залеганием водоупорных кристаллических пород. Вследствие этого уровень грунтовых вод поднимается и происходит заболачивание впадин.

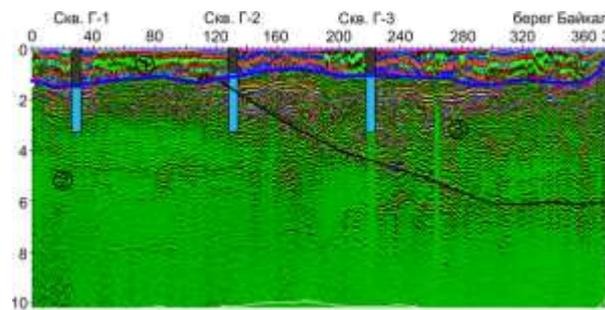
Рассмотрим гидрогеологическую ситуацию в с. Гремячинск, которое располагается на низкой береговой террасе, сложенной озерными отложениями. Залегание грунтовых вод установлено по восьми скважинам, пробуренным в селе. В четырех скважинах глубина залегания грунтовых вод менее 1 м, еще в 4 скважинах – менее 2 м.

Уровень воды в оз. Байкал в момент обследования скважин составлял 456.54 м ТО. Наиболее близки значения стояния воды в озере уровни грунтовых вод, установленные в скважинах Г2, Г3, Г4. Они характеризуются присутствием в разрезе крупного песка рыжего цвета. В пробуренных скважинах установлены значительные различия в уровне залегания грунтовых вод, которые достигают 1.37 м. Движение грунтовых вод на этом участке, исходя из наклона их зеркала, происходит в юго-западном направлении, где располагается долина реки Кика. В районе купола грунтовые воды характеризуются наибольшей минерализацией. Концентрирование растворов происходит за счет испарения воды.

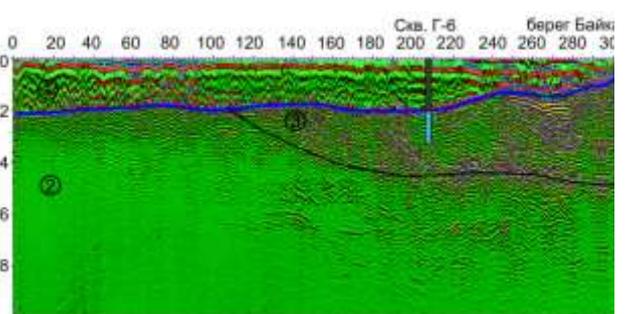
На георадиолокационном профиле ГР-1 отчетливо выделяются три комплекса пород, различающихся по физическим параметрам. Первый комплекс фиксируется в интервале глубин до 1.5-2м. Согласно результатам бурения, данный комплекс интерпретируется как озерные песчаные отложения. Для этого слоя определены электрофизические параметры, которые соответствуют сухим пескам. Второй комплекс выделяется в начале двух профилей в пределах отметок 0-120 м. Соответствует обводненным пескам озерного генезиса. Третий комплекс выделяется в прибрежной зоне на отметках 120-380 м. Он соответствует обводненным песчано-галечным отложениям с косослоистой структурой; падение в сторону оз. Байкал (рисунок 20). В скважинах Г2 и Г3 на границе слоев 1 и 3 выявлен хорошо проницаемый крупный песок рыжего цвета. Частицы песка покрыты пленкой гидроокислов железа. В месте приповерхностного расположения слоя рыжих песков наблюдается купол в залегании грунтовых вод. Они обнаружены в скважинах на глубине 0.90 м и 0.88 м, соответственно. Вероятно, это связано с тем, что по хорошо проницаемой зоне осуществляется гидравлическая связь грунтовых вод с озером Байкал.



А



Б



В

Рисунок 20 – Спутниковый снимок с. Гремячинск с местами расположения скважин и профилей радиолокационного зондирования (А), разрезы залегания осадочных горных пород, установленные методом георадиолокации (Б, В). Условные обозначения: 1 - расположение георадиолокационных профилей, 2 - места бурения скважин, 3 - территория подверженная умеренному подтоплению. Цифрами в круге показаны комплексы пород, различающиеся по физическим параметрам

Вероятно, по хорошо проницаемой зоне происходит движение воды из озера в сторону берега. В районе проницаемой зоны, которая имеет линейно вытянутую форму, формируется купол грунтовых вод. Под воздействием силы тяжести грунтовые воды растекаются с общим направлением движения в сторону реки Кика. В многоводные годы под воздействием напорного градиента в районе купола грунтовые воды могут разгружаться на поверхность земли.

7. Изменение рельефа в районе дельты Селенги

Наиболее интенсивному разрушению после подъема уровня оз. Байкал подверглись песчаные бары, которые сформировались в местах впадения в озеро крупных рек, приносящих взвешенный материал. Эти песчаные образования выполняют важную экологическую функцию, защищая от воздействия волн часть акватории озера, в которой происходит воспроизводство рыбных ресурсов. Подъем уровня озера привел к тому, что песчаные образования стали подвергаться более интенсивному волновому воздействию, что вызвало усиление процессов размыва. В результате волновой деятельности за короткий промежуток времени произошли значительные изменения в конфигурации баров, островов. Также после подъема уровня Байкала изменились условия осадконакопления в устьях рек, связанные с взаимодействием в системе «река – озеро».

Поверхность дельты постоянно меняется, в одних местах размываются острова, в других заиливаются и исчезают протоки. Причинами нарушения устойчивости являются как изменения гидрологических параметров в вершине дельты, так и перераспределение стока по рукавам, протокам и неравномерность устьевого удлинения [12]. Для отдельных проток дельты, как и для р. Селенги в целом, характерно распределение стока наносов в соответствии с расходами воды. В настоящее время максимальный сток вещества происходит по Лобановскому и Селенгинскому секторам и составляет 45 и 35 % соответственно, и только 20 % стока происходит по русловой сети Среднеустьевского сектора [13]. В то же время площадь этого сектора составляет 45–46 % от общей площади дельты. Сток распределяется по большому количеству мелких проток. Скорость течения воды в протоках этого сектора значительно меньше, чем в двух соседних секторах. Соответственно, и подъемная сила потока меньше. Поэтому в озерной части дельты этого сектора накапливаются наиболее тонкие фракции ила и глин, которые подвержены максимальному уплотнению. Здесь фиксируется наибольшее уменьшение площади островов за рассматриваемый период (рисунок 21).

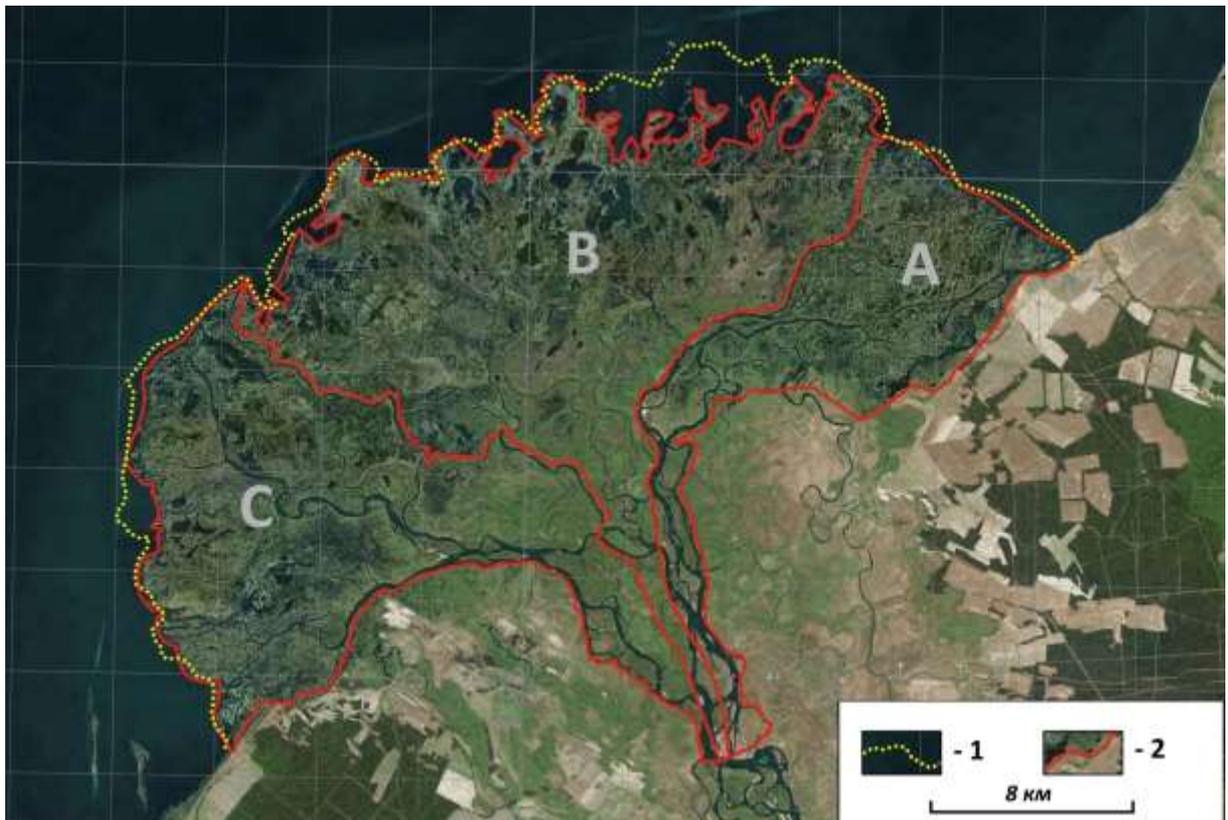


Рисунок 21 – Схема строения дельты р. Селенги, составленная на основе космоснимка 2020 г. Секторы: А – Лобановский, В – Среднеустьевский, С – Селенгинский [12]. 1 – контур дельты на основе топографической карты 1982 г. [14]; 2 – границы секторов

Это связано с тем, что подъем уровня оз. Байкал в среднем на 0.8 м привел к падению скорости движения воды в Селенге на подступах к дельте (выше с. Малое Колесово). В связи с этим, основная масса взвешенных и влекомых наносов стала осаждаться из водного потока в верхней и средней частях дельты. Здесь и обнаруживается наибольшая мощность аллювиальных отложений: за последние годы был накоплен их слой до 2–2.5 м. Абсолютные отметки поверхности в средней части дельты выросли и достигают 458–460 м БС. Исчезли мелкие протоки. Острова в районе с. Малое Колесово, которые считались вершиной дельты, соединились с правым берегом. Выше вершины дельты, в районе с. Жилино, в 2021 г. образовался осередок. Основной рукав реки сместился влево, и в этом месте активизировалась береговая эрозия.

Процесс накопления аллювиальных осадков в верхней и средней частях дельты будет продолжаться и дальше, так как в связи с подъемом уровня озера уменьшился уклон водной поверхности. Если уровень Байкала поднимется до более высоких отметок, то эрозионные процессы сместятся еще выше по течению Селенги. В озерном крае дельты будут аккумулироваться преимущественно тонкие фракции твердого стока, которые будут постепенно уплотняться, площадь дельты продолжит уменьшаться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Абразионное разрушение берегов Байкала происходит в многоводные годы, когда уровень оз. Байкал превышает 457 м ТО. В маловодные годы происходит перераспределение смытых с берегов осадков по акватории озера. В прибрежной части Байкала в эти годы могут накапливаться осадочные отложения в виде песчаных кос, баров, пляжей. Но эти осадки легко уносятся вдольбереговыми течениями в другие места и опасность разрушения береговых террас абразией сохраняется.

Несомненно, абразия представляет собой один из самых опасных процессов разрушения берегов при подъеме уровня Байкала, этот процесс имеет вероятностный характер протекания, так как зависит от нескольких факторов. Поэтому при мониторинге в пунктах наблюдения фиксируются большие различия в разрушении берегов. Максимальные разрушения, зафиксированные в отдельных пунктах наблюдения, в другой многоводный период могут проявиться в других местах. Поэтому для прогноза абразии необходимо пользоваться максимальными значениями и распространять их на участки побережья, сложенные сходными горными породами.

Предложенная методика расчета интенсивности годовой абразии на берегах оз. Байкал, учитывающая длительность высокого стояния воды в озере, позволяет достоверно оценивать масштабы разрушения берегов. Она позволяет сопоставлять абразию берегов при разном максимальном уровне воды в озере. На основании предложенной методики сделан прогноз развития абразии при планируемых подъемах уровня озера до 457.4 м, 457.5 м, 457.6 м, 457.7 м, 457.8 м и 457.85 м.

Установлены два механизма развития подтопления прибрежной территории оз. Байкал. Показано, что по проницаемым зонам озерная вода может проникать на расстояние более сотни метров от берега. В этом случае в зеркале грунтовых вод образуются купола. Подтоплению также благоприятствуют тектонические условия, сложившиеся на побережье. Чередование береговых горстов с тыловыми грабенами препятствует свободному стеканию грунтовых вод в озеро и в силу этого подтапливаются обширные территории побережья.

На протяжении длительного времени происходит уменьшение площади дельты р. Селенга. Это связано с тем, что в озерной части дельта сложена мелкозернистыми песками и илами, которые подвержены катагенезу. В результате уплотнения эти образования погружаются под поверхность воды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Гидроэнергетика и состояние экосистемы озера Байкал / А.А. Атутов, Н.М. Пронин, А.К. Тулохонов и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 280 с.
- 2 Агафонов Б.П. Экзолигодинамика Байкальской рифтовой зоны. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. – 176 с.
- 3 Чеботарев А.И. Общая гидрология. – Ленинград: Гидрометеорологическое изд-во, 1960. – 540 с.
- 4 Пинегин А.В. Динамика берегов оз. Байкал при новом уровненом режиме / Пинегин А.В., Рогозин А.А., Лещиков Ф.Н., Кулиш Л.Я., Якимов А.А. – М.: Наука, 1976. – 88 с.
- 5 Рогозин А.А. Береговая зона Байкала и Хубсугула. – Новосибирск: Наука, 1993. – 168 с.
- 6 Вика С. Эоловые и абразионные процессы побережий у залива Провал на Байкале / Вика С., Иметхенов А.Б., Овчинников Г.И., Снытко В.А., Щипек Т. – Иркутск: Из-во ИЗК СО РАН, 2006. – 56с.
- 7 Иметхенов А.Б. Бурятия: стихии и катастрофы. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2003. – 200 с.
- 8 Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири // ДАН. – 2010. – Т. 433. – № 5. – С. 1-6.
- 9 Резанов И.Н., Татьков Г.И., Коломиец В.Л., Нефедьев М.А., Чебаков Г.И., Булгако С.Б. Структурно-геологические исследования активной тектоники в Усть-Селенгинской впадине // Вестник Бурятского университета. Серия 3: География. Геология. – 1998. – № 2. – С. 15-29.
- 10 Плюсин А.М., Кислицина Л.Б., Жамбалова Д.И., Перязева Е.Г., Удодов Ю.Н. Особенности формирования химического состава грунтовых вод в дельте реки Селенга // Геохимия. – 2008. – №3. – С.243-252.
- 11 Будаев Р.Ц., Татьков Г.И., Коломиец В.Л. Тектоническое и литологическое строение юго-западной ветви Баргузинского рифта для оценки риска возникновения опасных природных процессов в восточном Прибайкалье // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т.14. – №1(8). – С. 2036-2039.
- 12 Дельта реки Селенги – естественный биофильтр и индикатор состояния озера Байкал / Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 314 с.
- 13 Ильичёва Е.А., Корытный Л.М., Павлов М.В. Русловая сеть дельты р. Селенги на современном этапе // Вестн. Томск. ун-та. – 2014. – № 380. – С. 190-194.

14 Альбом карт «Хамар-Дабан». М 1: 200000. ВТУ ГШ. Составлено по материалам съёмки 1982 г. Подписано в печать 10.12.1996.

Список работ, опубликованных по данному этапу (2023 г.)

Перязева Е.Г., Плюснин А.М. Абразионно-эрозионные изменения побережья Байкала на территории республики Бурятия в многоводные годы (2020-2021) // Геодинамика и минерагения Северной Евразии: Материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2023. – С. 415- 417.

Плюснин А.М. Количественная оценка абразионного разрушения берегов Байкала в связи с подъемом уровня плотинной Иркутской ГЭС // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева. – Томск, 2023. – С. 28- 32.

Плюснин А.М., Перязева Е.Г., Базаров А.Д., Чернявский М.К., Украинцев А.В. Прогноз подтопления побережья Байкала при изменении его уровня // Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования: Труды Всероссийской научной конференции с международным участием. – Москва, 2023. – С. 98-104.

Плюснин А.М., Перязева Е.Г. Абразия на берегах Байкала и прогноз разрушения побережья в многоводные годы // Водные ресурсы. – 2024 (в печати).

Плюснин А.М., Базаров А.Д., Украинцев А.В., Чернявский М.К., Черниговский Р.С., Перязева Е.Г. Подтопление восточного побережья Байкала // Водные ресурсы. – 2024 (в печати).

**Список работ, опубликованных по тематике проекта в соответствии с
государственным заданием**

1. **Перязева Е.Г., Плюснин А.М., Украинцев А.В.** Трансформация аккумулятивных форм рельефа в районе дельты Селенги под воздействием изменения уровня Байкала // География и природные ресурсы. – 2022. – № 5. – С. 115-123. DOI: 10.15372/GIPR20220512
2. **Плюснин А.М., Перязева Е.Г.** Воздействие подъема уровня Байкала на инженерные сооружения прибрежных поселений // География и природные ресурсы. – 2022. – № 5. – С. 74-82. DOI: 10.15372/GIPR20220508
3. **Плюснин А.М., Перязева Е.Г.** Абразия на берегах Байкала и прогноз разрушения побережья в многоводные годы. // Водные ресурсы. – 2024 (в печати)
4. **Плюснин А.М., Базаров А.Д., Украинцев А.В., Чернявский М.К., Черниговский Р.С., Перязева Е.Г.** Подтопление восточного побережья Байкала // Водные ресурсы. – 2024 (в печати)
5. **Базаров А.Д., Плюснин А.М., Украинцев А.В.** Использование георадиолокационного профилирования для выявления подтопления поселений северо-восточного побережья Байкала // Современные направления развития геохимии: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2022. – в 2-х томах. – Т. 1. – С. 49-51
6. **Перязева Е.Г., Плюснин А.М., Украинцев А.В.** Изменение конфигурации восточного побережья озера Байкал в связи с подъёмом его уровня // Эволюция биосферы и техногенез: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Чита, ИПРЭК СО РАН. – 2022. – Часть II. – С. 299–303
7. **Перязева Е.Г., Плюснин А.М.** Абразионно-эрозионные изменения побережья Байкала на территории республики Бурятия в многоводные годы (2020-2021 гг.) // Геодинамика и минералогия Северной Евразии: Материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского государственного университета, 2023. – С. 415- 417
8. **Плюснин А.М.** Количественная оценка абразионного разрушения берегов Байкала в связи с подъемом уровня плотинной Иркутской ГЭС // Геологическая эволюция

взаимодействия воды с горными породами: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева. – Томск, 2023. – С. 28- 32

9. **Плюснин А.М., Перязева Е.Г., Базаров А.Д., Чернявский М.К., Украинцев А.В.** Прогноз подтопления побережья Байкала при изменении его уровня // Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования: Труды Всероссийской научной конференции с международным участием. – Москва, 2023. – С. 98-104

10. **Plyusnin A.M., Peryazeva E.G., Ukraintsev A.V.** Abrasion and accumulation processes on the eastern coast of Baikal: past, present, future // Ресурсы, окружающая среда и региональное устойчивое развитие в Северо-Восточной Азии: Тезисы докладов V Международной научной конференции (Иркутск, 23–26 августа 2022 г.). – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2022. – P.185