

*На правах рукописи*

ХОМЧАНОВСКИЙ АНТОН ЛЕОНИДОВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА  
АККУМУЛЯТИВНЫХ БЕРЕГАХ (НА ПРИМЕРЕ ОЗ. БАЙКАЛ, ОСТРОВНОЙ  
БАР ЯРКИ)

1.6.14 – Геоморфология и палеогеография

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в лаборатории активной тектоники и палеосейсмологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук».

Научный руководитель:

**Бровко Петр Федорович**

доктор географических наук, профессор  
Департамента наук о Земле Школы  
естественных наук Дальневосточного  
федерального университета

Официальные  
оппоненты:

**Жиндарев Леонид Алексеевич**

доктор географических наук, ведущий научный сотрудник  
кафедры геоморфологии и палеогеографии географического  
факультета Московского государственного  
университета им. М. В. Ломоносова

**Корзинин Дмитрий Викторович**

кандидат географических наук, старший научный сотрудник  
лаборатории шельфа и морских берегов им. В.П. Зенковича  
Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Ведущая организация:

Институт земной коры СО РАН

Защита состоится 26 ноября 2021 г., в 13:30, на заседании диссертационного совета 24.1.049.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт географии РАН» по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института географии РАН, [www.igras.ru](http://www.igras.ru) и официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.049.02  
кандидат географических наук



Е.А. Белоновская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Изучение гидродинамических, морфодинамических и литодинамических процессов в береговой зоне является важной составляющей познания особенностей рельефообразования и осадконакопления в крупных водных объектах: морях, озерах, водохранилищах. В связи с интенсивной антропогенной нагрузкой на берега особую актуальность приобретает комплексное рассмотрение этих процессов.

После перекрытия в 1959 году р. Ангара в 65 км от ее истока был создан Иркутский гидроузел, в результате чего уровень оз. Байкал поднялся более чем на 1 м. Наибольшее воздействие на состояние берегов Байкала оказало повышение уровня воды, при котором береговая линия сместилась в сторону суши. На оз. Байкал от подъема уровня особенно пострадали аккумулятивные берега, в т.ч. в его северной части – островной бар Ярки. При первоначальном повышении уровня воды начался интенсивный размыв берегов и, соответственно, происходило сокращение площади бара: береговая линия отступила, в среднем, на 100-150 м, а на приустьевых участках до 350 м и более [Потемкина, Потемкин, 2007]. До строительства Иркутской ГЭС площадь Ярков составляла 3.7 км<sup>2</sup>, а в настоящее время она снизилась вдвое и не превышает 1.8 км<sup>2</sup>.

В последнее время в связи со значительными колебаниями уровня оз. Байкал, связанными как с климатическими, так и антропогенными факторами, возросла актуальность исследования влияния изменений уровня озера на динамику аккумулятивных берегов. Одним из новейших и наиболее действенных методов изучения береговых литодинамических процессов является математическое моделирование. Однако проблема заключается в том, что на данный момент так и не создано универсальной модели, которая учитывала бы все факторы, влияющие на динамику берегов. Поэтому к выбору комплекса моделей и их верификации надо подходить особенно тщательно.

В данной работе предпринята попытка математического моделирования литодинамических процессов на аккумулятивных берегах островного бара Ярки (оз. Байкал) и сопоставление результатов моделирования с данными натурных наблюдений.

**Степень разработанности темы.** В последнее столетие вполне детально были изучены процессы переформирования и переработки берегов Байкала. Исследованы берега с выраженными абразионными процессами, сделаны оценки скорости абразии и трансформации береговой зоны [А.А. Рогозин, 1993; А.В. Пинегин, 1976; Е.А. Козырева, 2006]. Т.Г. Потемкиной изучена литодинамика оз. Байкал, дана количественная оценка переноса осадков в прибрежной зоне на основе балансового метода. Рассмотрены геолого-геоморфологические условия и гидро-литодинамические факторы на отдельных участках береговой зоны Байкала, приведены сравнительные характеристики, выявлены особенности процессов седиментации, показаны основные факторы разрушения и восстановления островного бара Ярки [Потемкина, 2011]. В рамках научно-исследовательских работ на аккумулятивных образованиях северного Байкала проходили инженерные изыскания для берегоукрепления и

защиты участков берега в Северобайкальском районе Республики Бурятия, в ходе которых выполнялся сбор данных по геологии, гидрологии озера и распространению вечной мерзлоты. Однако на данный момент на Байкале не было проведено комплексных работ по моделированию береговых литодинамических процессов. Удалось найти лишь неопубликованные весьма краткие данные по расчету вдольберегового перемещения наносов вдоль Нижнеангарской косы, выполненные Е.К. Гречищевым в рамках инженерных изысканий для строительства БАМ. Автор диссертации предпринял попытку промоделировать береговые процессы на островном баре Ярки. Для этих целей были совершены детальные промеры подводного берегового склона, которые также выполнены впервые, а на их основе построена цифровая модель рельефа, которая использовалась как исходная сетка для математического моделирования.

**Объект исследования:** аккумулятивный берег оз. Байкал (на примере островного бара Ярки). **Предмет исследования:** литодинамические процессы на островном баре Ярки.

**Цель работы:** проведение математического моделирования литодинамических процессов на аккумулятивном берегу островного бара Ярки (оз. Байкал) и сопоставление результатов моделирования с данными натурных наблюдений.

**Задачи исследования:**

1. Проанализировать динамику о. Ярки на основе сравнения его современной конфигурации с материалами предыдущих исследований;
2. Составить цифровую модель рельефа подводного берегового склона;
3. Составить подробную геоморфологическую карту-схему островного бара Ярки на основе данных, полученных в ходе детальных топографических и гидрографических работ на участке берега от устья р. Кичера до устья р. Верхняя Ангара;
4. Провести выбор, верификацию и апробацию комплекса методов математического моделирования береговых процессов для аккумулятивных побережий (в том числе, с использованием данных, собранных автором ранее для аккумулятивных побережий Новосибирского водохранилища).
5. Рассчитать теоретические профили относительного динамического равновесия для различных участков подводного берегового склона о. Ярки и сравнить их с измеренными профилями;
6. Методом математического моделирования рассчитать преобладающее направление и ёмкость вдольберегового перемещения наносов;
7. На основе математических моделей (Cross-P и Дина-Маурмайера) оценить переформирование островного бара Ярки с учетом изменения уровня озера на 1 м;
8. Провести прогноз смещения берега при уменьшении и увеличении уровня озера на 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 и 3 м;
9. Оценить особенности развития гидродинамических, литодинамических и морфодинамических процессов в береговой зоне островного бара Ярки на основе расчетов и натурных наблюдений;

**Научная новизна работы и личный вклад автора** заключаются в сборе, обработке фактического материала, дальнейшей интерпретации и

анализе полученных результатов. В результате впервые проведенного крупномасштабного обследования островного бара Ярки нанесены на карту контуры линии берега. Получены параметры рельефа островного бара и гранулометрический состав слагающих его рыхлых отложений более чем в 100 точках. Построено 20 профилей рельефа побережья островного бара от глубины 20 м со стороны озера Байкал до уреза воды со стороны лагуны Ангарский Сор. Впервые проведена детальная батиметрическая съемка рельефа дна прилегающей акватории и на ее основе построена цифровая модель. Выявлены особенности гидродинамических, морфодинамических и литодинамических процессов, контролирующих состояние берегов островного бара Ярки. Определено направление преобладающего перемещения наносов. Впервые проведено математическое моделирование по переформированию рельефа дна прибрежной части островного бара Ярки с применением различных моделей при разных гидрометеорологических параметрах в условии изменения уровня. На их основе выявлены основные причины геоморфологических изменений и рассчитаны их количественные показатели.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты исследования могут быть использованы широким кругом специалистов географических специальностей для оценки современных геоморфологических природных процессов в береговой зоне крупных озер и водохранилищ. Ряд выводов данной работы может быть полезен для сотрудников Управления эксплуатации Иркутской ГЭС, в особенности, выводы об уровне озера, при которых прекращается размыв берегов островного бара и начинается его стабилизация. Эти данные представляют наибольшую значимость как в теоретическом, так и в практическом плане.

Основные результаты исследования получены при выполнении работ в соответствии с государственными контрактами: «Исследование природных процессов на островном баре Ярки (северный Байкал) и разработка научно обоснованных рекомендаций по предотвращению вредного воздействия вод на его берега и восстановлению утраченных территорий» по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 гг.». Для инженерных береговых исследований, наравне с методами расчетов, представленных в нормативных документах РФ, предлагается использовать методы моделирования, использованные в данной работе. Результаты исследования также могут быть полезны при решении аналогичных задач для подобных аккумулятивных побережий озер и водохранилищ. Материалы диссертации используются в учебном процессе в Дальневосточном федеральном университете при чтении курсов «Береговедение» и «Комплексное управление прибрежными зонами».

**Методы исследования.** В работе применялись методы комплексных физико-географических и геоморфологических исследований, включая полевые (геодезическая съемка, промерные гидрографические работы, отбор проб, геоморфологическое описание местности), а также дистанционные. Основной объем фактического материала получен при проведении экспедиционных

исследований в северной части оз. Байкал (островной бар Ярки, о. Миллионный, Нижнеангарская коса, Дагарская коса), а также при работах на Новосибирском водохранилище. При создании цифровой модели рельефа (ЦМР) прибрежной части островного бара Ярки и составлении цифровых карт использовались методы геоинформационного картографирования. Для прогноза эволюции профиля подводного берегового склона использовался метод математического моделирования (модель CROSS-P). Программное обеспечение ГИС: программный комплекс ArcGIS 9.2 (ESRI Inc.). При моделировании переформирования профилей равновесия подводного склона в условиях колебания уровня водоема использовались зависимости Брууна-Зенковича [Зенкович, 1962; Bruun, 1954] и Дина-Маурмайера [Dean, Maurmeyer, 1983].

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Повышение среднегодового уровня озера Байкал на 1.2 м в результате строительства Иркутской ГЭС является главным фактором, влияющим на современную морфо- и литодинамику аккумулятивных участков побережья.

2. В прибрежной зоне островного бара Ярки выявлено два разнонаправленных потока наносов. Поток, направленный на запад, переносит в год в 8 раз больше материала, чем поток восточного направления, поэтому большая часть твердых наносов, приходящих из р. Верхняя Ангара, уходит к устью р. Кичера. Такому направлению результирующего перемещения наносов способствует большая энергия волн с ЮЮЗ направления.

3. При достижении уровня 456.6 м ТС (Тихоокеанская система высот) происходит восстановление литодинамической системы островного бара Ярки, что выражается в занесении песчаным материалом прорв между фрагментами бара, увеличении площади отмели между фрагментами и уменьшении ее глубины. По результатам прогнозирования показано, что при опускании уровня озера на 1 м бар вернется на свое прежнее положение (до строительства Иркутской ГЭС).

**Степень достоверности и апробация результатов исследования** обеспечены значительным объёмом исходных материалов, использованием современных методов, как полевых (с применением высокоточного оборудования), так и камеральных (методы геоинформационного картографирования и математического моделирования), анализом значительного количества российских и зарубежных источников, апробацией основных результатов на российских и международных научно-практических конференциях. Среди них: международные научно-практические конференции в Туапсе (2011), Клайпеде (2012), Перми (2013), Иркутске (2013, 2017), Париже (2013), Саратове (2013), Мурманске (2018), Севастополе (2020). По теме диссертации опубликовано 12 работ, включая 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК; соискатель является соавтором коллективной монографии «Мониторинг береговой зоны внутренних водоемов России».

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю д.г.н. П.Ф. Бровко за всестороннюю поддержку и помощь при обсуждении полученных результатов. Также автор считает своим

долгом выразить искреннюю благодарность А.Ш. Хабидову за организацию экспедиционных исследований и помощь на начальных этапах написания работы. За оказанную поддержку и ценные замечания автор благодарен К.В. Марусину и Т.К. Пинегиной. Большая помощь в составлении структуры диссертации была оказана Г.Ю. Ямских. На этапе экспедиционных исследований и камеральной обработки полученных материалов огромное содействие было оказано со стороны Е.А. Федоровой и В.В. Карпова. Всем им автор выражает искреннюю благодарность. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-17-00049, рук. Е.И. Гордеев.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 191 страниц текста, включая 67 рисунков, 26 таблиц, 57 формул и 13 приложений. Список использованной литературы представлен 131 наименованием.

В главе 1 «Природные условия и история изучения островного бара Ярки» приводится географическое положение исследуемого объекта, его геологическое строение и рельеф. Особое внимание уделяется гидроклиматическим условиям, в особенности уровенному режиму озера, поскольку антропогенное изменение уровня оз. Байкал рассматривается как важный фактор литодинамики островных баров.

Островной бар Ярки расположен в северной части оз. Байкал (рис. 1). Длина участка составляет 17 км. Ярки представляет собой песчаный бар, в основном сложенный средне-зернистыми песками, отделяющий от Байкала заболоченный залив – Ангарский Сор. Скорость ветра на исследуемом участке достигает 22 м/с, максимальная высота волны – 4.7 м, наиболее волноопасные румбы южный и юго-западный. Максимальная амплитуда колебаний уровня в



Рис. 1. Район исследования

естественных условиях составила 198 см, в зарегулированном режиме – 223 см, среднее значение годового уровня с 1899 г. по 1950 г. – 455.62 м ТС

(Тихоокеанская система высот). Для перехода от Тихоокеанской системы к Балтийской существующей (абс.) отметки уровней необходимо уменьшить на 52 см. Проектом Иркутской ГЭС нормальный подпорный уровень (НПУ) в ТС предусматривался на отметке 457.00 м. По факту среднее значение годового уровня с 1960 г. по 2001 г. составило 456.93 м ТС, максимальный же уровень неоднократно поднимался выше отметки 457 м. В связи с большим объемом водных масс оз. Байкал полностью обычно замерзает только в январе, ледостав длится до конца мая – начала июня.

В разделе 1.4 представлена история изучения литодинамики берегов Байкала и островного бара Ярки. Абразионными процессами и их роли в литодинамической системе Байкала занимались А.В. Пинегин, А.А. Рогозин, Ю.Б. Тржцинский и др. Данные авторы дают анализ процесса формирования берегов оз. Байкал, динамики их изменения при новом зарегулированном уровненом режиме и прогноз ширины зоны размыва берегов на состояние 1976 года. Современные проблемы литодинамики прибрежной зоны Байкала (в том числе островного бара Ярки) освещены в работах Т.Г. Потёмкиной, Н.А. Ярославцева, В.А. Петрова, Е.А. Козыревой и др. Т.Г. Потёмкина провела анализ и установила тренды динамики годовых расходов воды и взвешенных наносов р. В. Ангара, рассмотрела геоэкологические аспекты сохранения песчаного бара Ярки, где представлены основные гипотезы образования бара и факторы, влияющие на его разрушение и восстановление. В.А. Петров и Н.А. Ярославцев в своих работах оценили динамику бара Ярки, проблемы его восстановления и современные потоки наносов. Е.А. Козырева с соавторами особое внимание уделила рассмотрению эоловых процессов и их роли в динамике о. Ярки.

Во **второй главе «Методы изучения берегов и модели литодинамических процессов»** наряду с традиционными географическими методами (сравнительный, описательный, картографический и др.) рассматривались новейшие методы ГИС и численного математического моделирования, которые применялись в данной работе. На основании детальных полевых исследований (геоморфологическое описание, топографическое профилирование, гидрографические промеры, отбор проб, GPS съёмка) при помощи программы ArcGIS были построены: цифровая модель рельефа прибрежной зоны, батиметрическая карта, карта-схема положения береговой линии в разные годы, геоморфологическая карта-схема (рис. 2, 3). По данным топографической съёмки были созданы профили берегового склона (рис. 4), которые использовались как исходный материал для моделирования и прогнозирования литодинамических процессов.

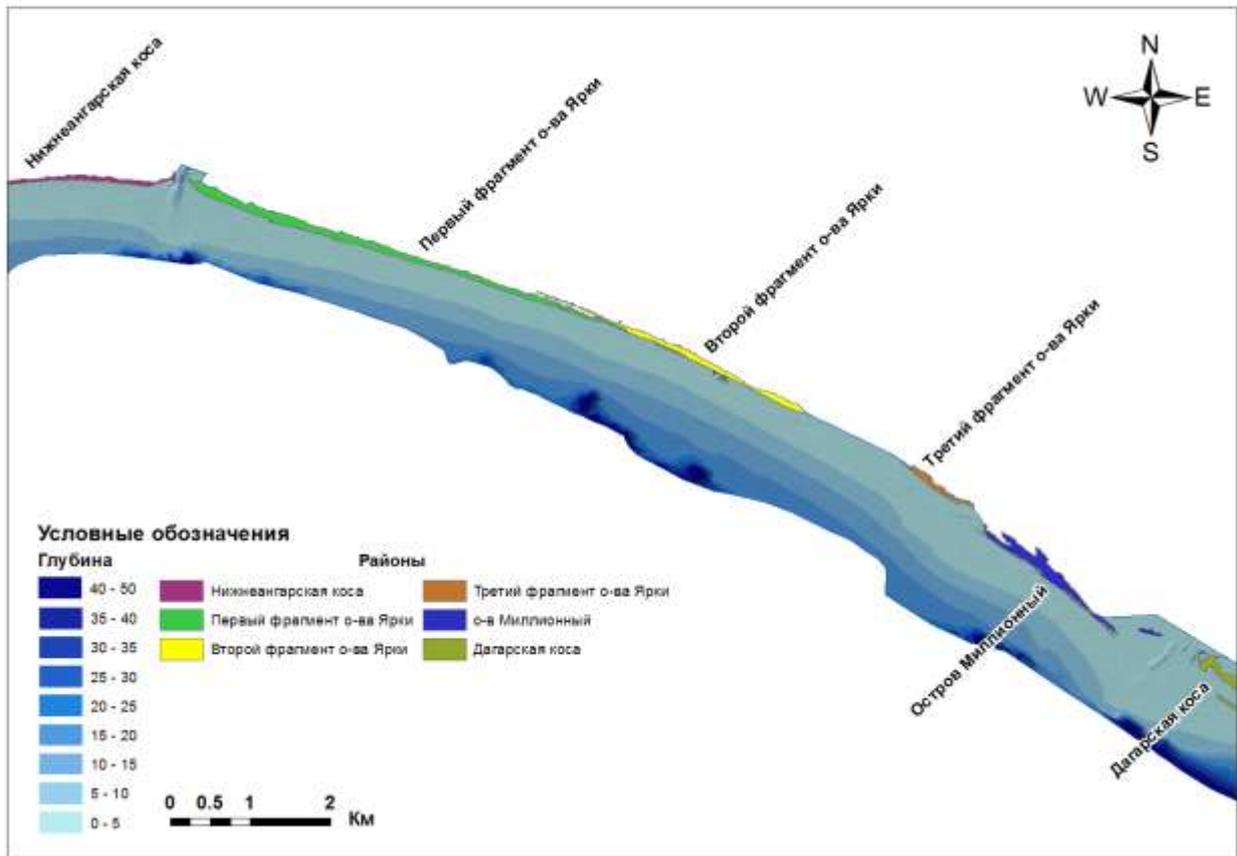


Рис. 2. Карта-схема районирования о. Ярки и цифровая модель рельефа его побережья

В разделе 2.2 рассмотрены современные методы математического моделирования и прогнозирования процессов развития берегов водоемов. Дано объяснение понятия «профиль динамического равновесия», которое широко используется в существующих концепциях развития прибрежного рельефа. Проанализирован опыт как российских (Ю.М. Крылов, И.О. Леонтьев), так и зарубежных (П. Бруун, Р. Дин) ученых. В разделе представлены модели вдольберегового транспорта наносов, штормовых деформаций, сезонных изменений берегового профиля и эволюции профиля в масштабах десятков и сотен лет.

В разделе 2.3 представлены результаты экспериментов автора по расчету литодинамических процессов на различных аккумулятивных берегах (на примере Новосибирского водохранилища) с помощью различных моделей и программных продуктов. Новосибирское водохранилище являлось полигоном для отработки различных методик моделирования береговых процессов. Поскольку некоторые объекты на Новосибирском водохранилище морфологически и литологически схожи с объектом исследования на Байкале, был сделан вывод о том, что методы, модели и программы применимы для моделирования на островных барах северного Байкала. Был проведен сравнительный анализ результатов моделирования с натурными данными, что впоследствии позволило выбрать наилучшие модели для конкретных случаев. Таким образом, была выбрана окончательная методика, которая использовалась в диссертации.

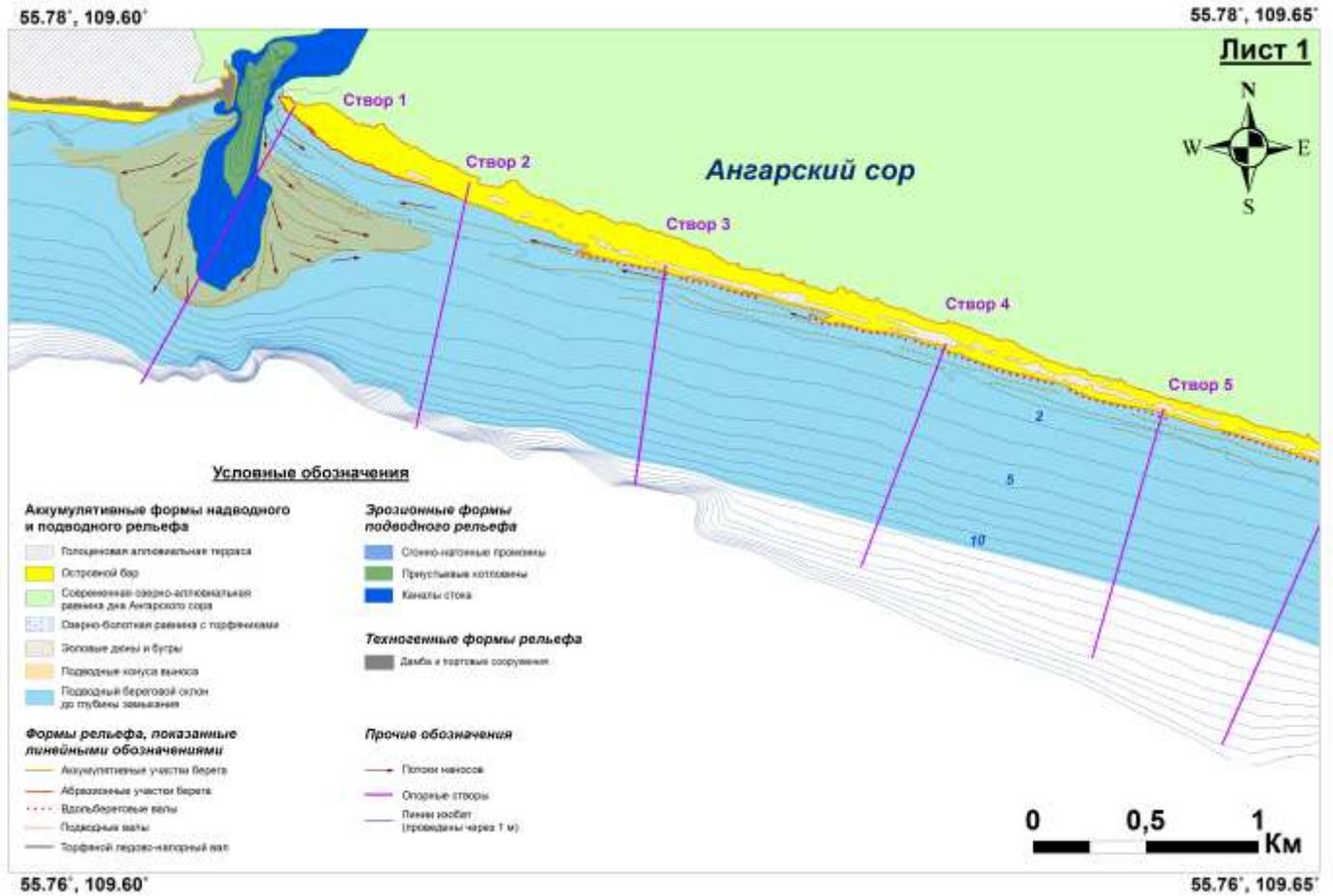


Рис. 3. Фрагмент геоморфологической карты-схемы бара Ярки. Масштаб 1:5000

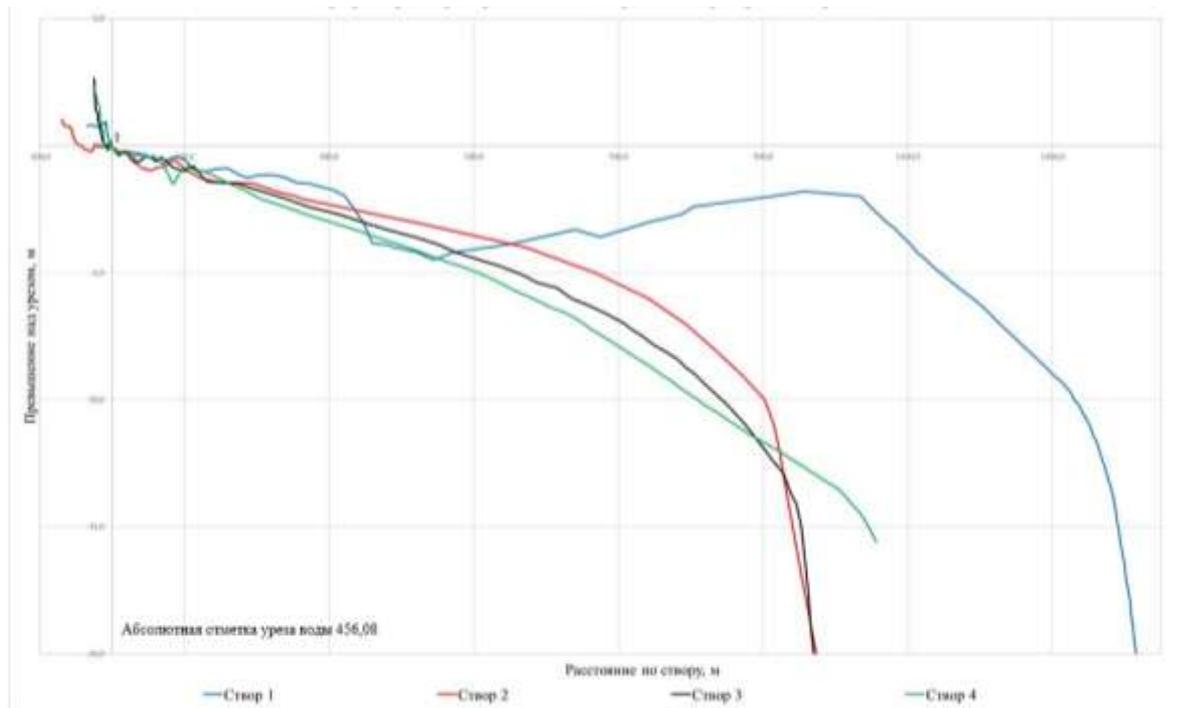


Рис. 4. Профили рельефа береговой зоны островного бара Ярки. Створы 1-4

В главе 3 «Формирование аккумулятивных форм рельефа» рассматриваются общие принципы формирования аккумулятивных берегов, основные формы рельефа, их генезис и история изучения. Особое внимание уделяется различным режимам переформирования берега в результате изменения уровня водоема. В конце раздела 3.1 приводится описание барьерных форм рельефа, история их изучения и основные концепции образования и развития. По мнению автора, наиболее достоверной гипотезой образования островных баров является их образование в результате трансгрессии моря [Игнатов, 2004], уровень которого и определяет дальнейшую динамику этих форм рельефа. При быстром повышении уровня аккумулятивные берега могут просто затапливаться. Если скорость изменения уровня уменьшается, начинается процесс переработки берега по одному из нескольких сценариев: размыв уреза и аккумуляция материала на подводном береговом склоне (правило Брууна-Зенковича); размыв подводного берегового склона и аккумуляция на урезе; размыв подводного склона и уреза, аккумуляция со стороны лагуны и увеличение абсолютных отметок барьерной формы (модель Дина-Маурмайера). Развитие аккумулятивных форм рельефа может проходить и по смешанному сценарию.

Раздел 3.2 посвящен рассмотрению аккумулятивных берегов на водоемах с искусственным регулированием уровня. В первой части раздела приведены данные по Новосибирскому водохранилищу, показаны типы берегов и их геоморфологическое описание. Наиболее детально описан искусственный песчаный пляж Новосибирского академгородка, для которого автором был проведен ряд экспериментов по математическому моделированию береговых процессов. В одном из таких экспериментов прослеживалась сходная динамика подводного вала на Новосибирском водохранилище и островного бара Ярки на Байкале после подъема уровня (рис. 5). Во втором разделе рассмотрены аккумулятивные формы рельефа оз. Байкал. Наибольшее внимание уделено барьерным формам, отчленяющим мелководные лагуны. Островные бары являются вполне типичными формами рельефа для Байкала. А.А. Рогозин (1976) довольно подробно описал динамику шести таких участков. Все они были подвержены значительному изменению в результате подъема уровня оз. Байкал после строительства ГЭС.

В разделах 3.3-3.6 рассмотрено влияние колебаний уровня оз. Байкал на формирование берегов, роль вдольберегового перемещения наносов в динамике берегов островного бара Ярки и результаты детального обследования острова в 2006 и 2013 годах, когда были выявлены основные морфологические изменения. Повышение уровня оз. Байкал после создания Иркутского гидроузла привело к изменению природного хода экзогенных рельефообразующих процессов. Усилилась абразия берегов и активизировались склоновые процессы, начался размыв аккумулятивных форм, формирование которых происходило длительное время при естественном уровне воды в озере. За 1959-1964 гг. на отмелях аккумулятивных берегах береговая линия сместилась в среднем на 17-20 м [Рогозин, 1976]. За более чем 40 лет наблюдений берега оз. Байкал отступили под действием волн на расстояние до

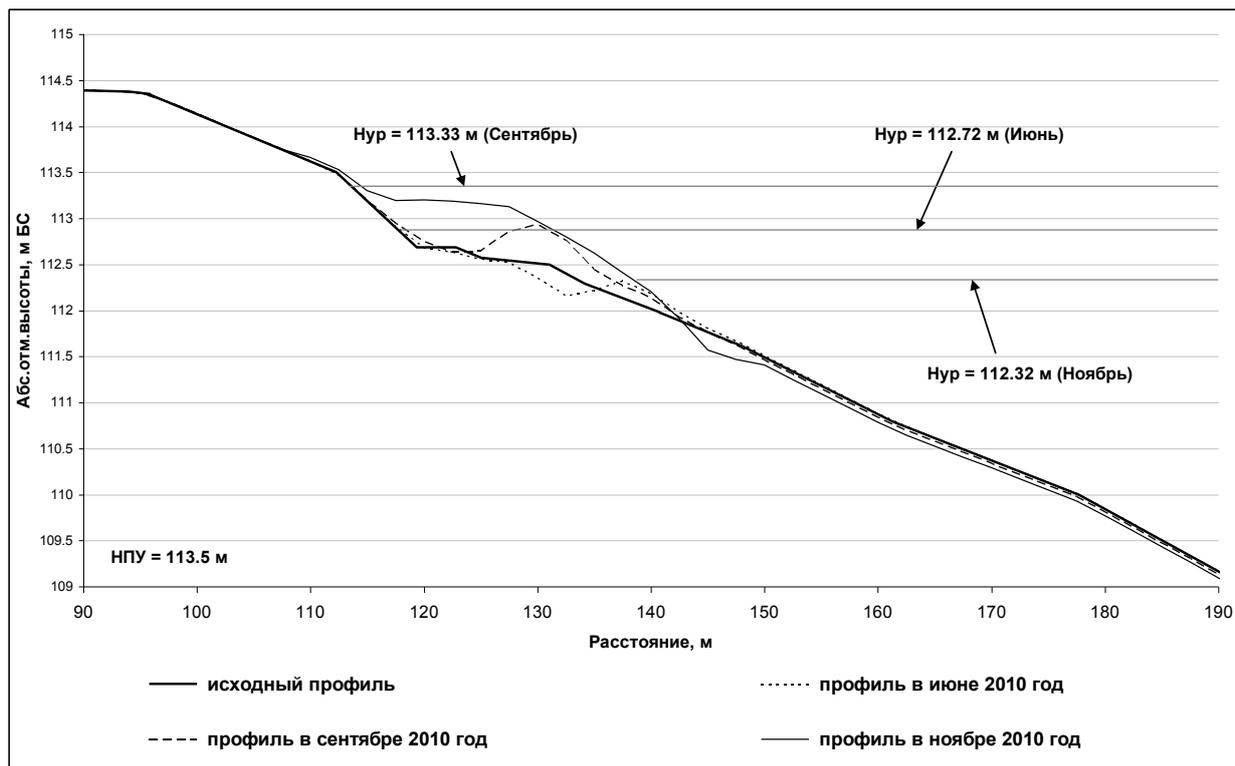


Рис. 5. Результат моделирования штормовых деформаций профиля искусственного пляжа на Новосибирском водохранилище

110-120 м, причем абразия берегов привела и к заметной активизации склоновых процессов (оползней, осыпей, обвалов).

Вдольбереговой транспорт наносов, как важный фактор, определяющий динамику бара Ярки, отмечал Е.Н. Гречищев (1999), который впервые рассмотрел этот вопрос с количественной точки зрения. В 2004-2006 гг. НИЦ «Морские берега» также отметили существенную роль этого фактора, не только на прилегающих косах (Дагарской и Нижнеангарской), но и на самих Ярках. Расчеты и морфологические признаки указывают на то, что результирующее перемещение наносов направлено от устья р. Верхняя Ангара в сторону устья р. Кичера [Потемкина, Ярославцев, 2008]. О преобладании вдольберегового перемещения песка в этом направлении указывает более интенсивный размыв восточной части первого фрагмента островного бара. Западная часть острова Миллионный нарастает в результате роста песчаной косы, получающей питание за счет подачи материала со дна и вдоль берега. На поверхности косы видны два, а местами и три штормовых вала. У всех сохранившихся фрагментов острова встречаются подводные валы-косы, корневая часть которых примкнута к берегу. Такие формы подводного рельефа все без исключения ориентированы на запад, что указывает на преимущественное направление вдольберегового переноса песка. Еще одним косвенным подтверждением переноса песка на запад является изменение средней крупности состава пляжевого материала.

Состав пляжевого материала на островах Ярки\*

Место отбора проб	Мелко-зернистый D<0.25 мм, %	Средне-зернистый 0.25-0.50 мм, %	Крупно-зернистый D>0.50 мм, %	Медианный диаметр, D <sub>50%</sub> , мм
Фрагмент 1	64.5	34.9	0.6	0.24
Фрагмент 2	45.2	54.3	0.6	0.26
Фрагмент 3	40.3	59.0	0.7	0.27
Остров Миллионный	15.5	79.9	4.6	0.34

\*Расположение фрагментов показано на рисунке 2

Как видно из таблицы 1, средняя крупность песка уменьшается с 0.34 мм до 0.24 мм по мере удаления от устья р. Верхняя Ангара (о. Миллионный) в сторону р. Кичера. Это происходит, в основном, за счет увеличения в пляжевых отложениях доли мелкозернистой фракции. Подъем уровня обусловил не только уменьшение стока наносов в устьях рек. В первые годы после подъема уровня пляжеобразующий материал просто не доходил до устьев из-за подпора, оседая в руслах и протоках верхней части дельты. Это привело к кардинальному изменению морфологии устьев рек и негативно отразилось на динамике берегов острова. В настоящее время значительная, а, возможно, и большая часть песка, подаваемая волнами от устья р. Верхняя Ангара, уходит в просвет протяженностью 2.3 км между вторым и третьим островами и наращивает ширину зоны мелководья со стороны Ангарского Сора. Аналогичная картина наблюдается за промоиной у восточного конца первого острова. Поэтому и происходит интенсивный размыв восточных частей фрагментов островного бара. Вышеперечисленные факты являются доказательством второго защищаемого положения, утверждающего, что в прибрежной зоне островного бара существуют два разнонаправленных потока наносов. Перемещение песчаного материала в западном направлении играет важную роль в рельефообразовании и осадконакоплении данной литодинамической системы. Результаты детального обследования позволили установить, что в 2006 г. островной бар Ярки состоял из трех фрагментов, отделенных друг от друга двумя промоинами: одна между первым и вторым фрагментом (см. рис. 2) шириной около 40-50 м, и другая между вторым и третьим фрагментом – около 2.5 км. Исследования 2013 года показали, что он состоит уже из двух фрагментов. К весьма существенным изменениям (после 2006 г.) можно отнести размыв западной оконечности острова в районе устья р. Кичера и аккумуляцию материала на западных оконечностях о. Миллионный. Почти на всем протяжении между устьями рек Кичера и Верхняя Ангара, т.е. в пределах островов Ярки и Миллионный с байкальской стороны к берегу причленились вышедшие на поверхность песчаные валы, отделившие небольшие по ширине и глубине лагуны или образовавшие протяженные косы (рис. 6).

В разделе 3.6.1. представлены результаты изменения морфометрических показателей островного бара Ярки после строительства Иркутской ГЭС. Сравнив современные измеренные данные с топографической картой 1962 г., мы пришли к выводу, что за последние 60 лет площадь бара сократилась более

чем наполовину (62%), а средняя и минимальная ширина уменьшилась на 100 м.



Рис. 6. Косы с байкальской стороны островного бара Ярки

В разделе 3.6.2. рассматривается реакция профиля береговой зоны островного бара Ярки на повышение уровня оз. Байкал. Р. Дин и Е. Маурмайер представили модернизацию правила Брууна-Зенковича для островных баров [Dean et al., 1983]. При повышении уровня моря бар будет отступать как единое целое вглубь суши, при этом увеличивая свои абсолютные отметки высоты на величину подъема уровня – т.е. совершать движение «назад и вверх». Для оценки пространственного смещения островного бара Ярки после подъема уровня озера Байкал в результате строительства Иркутской ГЭС, была построена карта с очертаниями бара 1962 и 2013 гг., где по 21 створу было посчитано истинное отступление, которое составило 128 м (рис. 7). Смещение бара по формуле Дина-Маурмайера при повышении уровня на 1 м в среднем составляет – 110 м, что, в принципе, согласуется с полученными натурными данными.

В 4 главе «Математическое моделирование литодинамических процессов для островного бара Ярки» представлены результаты моделирования литодинамических процессов береговой зоны бара Ярки. Для всех измеренных профилей был рассчитан общий теоретический профиль равновесия, который лежит ниже реального профиля подводного берегового склона. Это говорит об аккумулятивном характере побережья и о поперечном движении наносов вверх по склону. Такой факт подтверждает адаптацию литодинамической системы для о. Ярки в целом. Весь участок исследования от Нижнеангарской до Дагарской косы был разбит на 4 участка с примерно одинаковым медианным гранулометрическим составом песка. Для каждого участка отдельно был рассчитан профиль динамического равновесия по модели Дина. Для того чтобы проследить динамику устойчивости профиля и характера

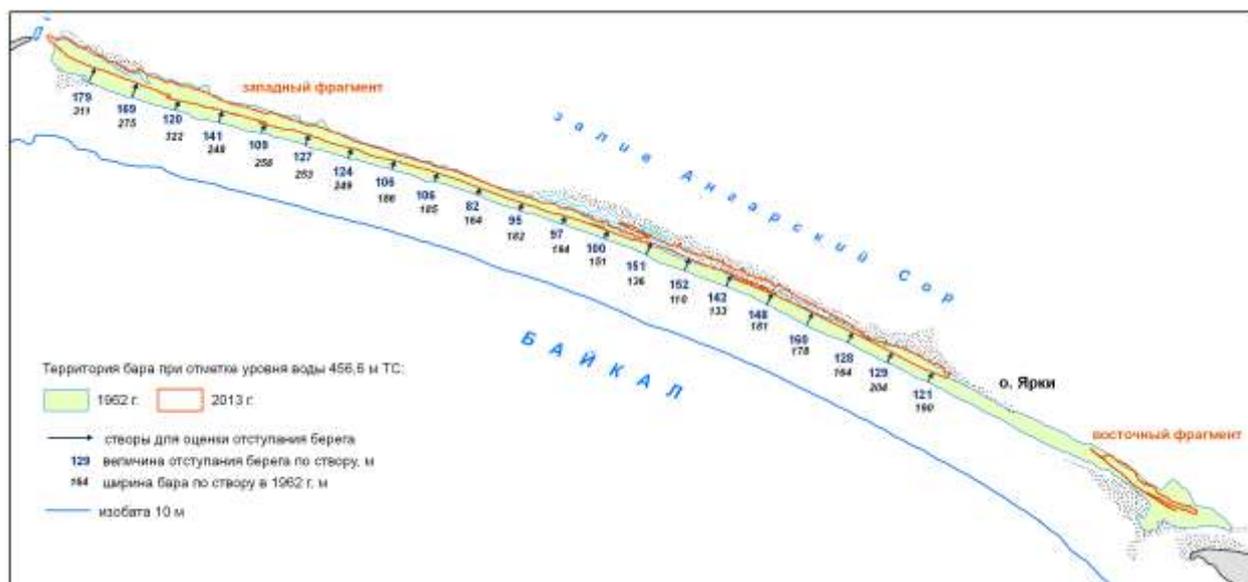


Рис. 7. Пространственное смещение островного бара Ярки после подъема уровня озера Байкал в результате строительства Иркутской ГЭС, 1962-2013 гг.

поперечного перемещения материала, теоретические профили каждого участка сравнивались между собой и анализировались методами математической статистики. В итоге был четко установлен тренд уменьшения угла наклона профиля равновесия с востока на запад (рис. 8). Этот факт говорит об уменьшении крупности материала к западу, что подтверждается натурными данными и свидетельствует в пользу применения данной модели в существующих условиях. Из приведенных данных видно, что на всех участках

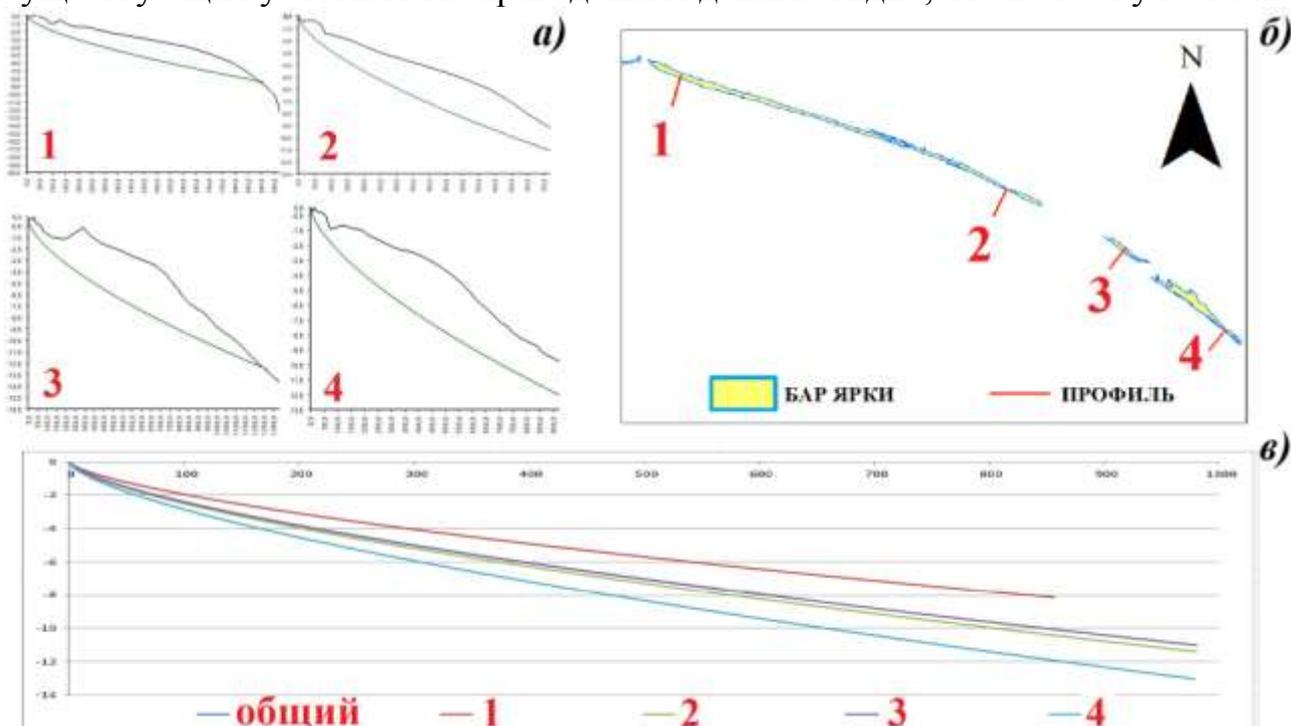


Рис. 8. Расчеты теоретических профилей равновесия: а) реальный профиль (черный) и рассчитанный профиль равновесия (зеленый) по участкам; б) расположение участков; в) теоретические профили равновесия по участкам и общий профиль равновесия для бара Ярки

профиль равновесия лежит ниже натуральных профилей, откуда следует вывод, что участки размыва связаны с дефицитом наносов и контролируются вдольбереговыми перемещениями материала.

Для моделирования штормовой переработки берега рассматривались теоретические функции параметров волн в конкретных расчетных точках и активные волноопасные румбы. В дальнейшем эти параметры являлись входными данными для расчета устойчивости профиля береговой зоны к воздействию штормовых волн для различных уровней водоема. Для этой цели использовалась математическая модель штормовых деформаций профиля песчаного берега, разработанная И.О. Леонтьевым (2001) и реализованная для практического использования в программном продукте CROSS-P.

В качестве объекта исследований был выбран участок берега, лежащий в самом узком месте островного бара. Ширина надводной части участка на момент съемки (11 августа 2013 г.) составляла 32 метра, а максимальное возвышение над урезом – 1.5 м. Расчеты волнового воздействия проведены для штормов разной силы (рис. 9). Под воздействием мощного шторма подводный береговой склон подвергся небольшому размыву на значительном протяжении, а изъятый материал был перемещен и отложен частично на глубине, а частично – в приурезовой полосе. В итоге шторм привел не к разрушению, а к надстройке надводной части. Под действием штормов разной силы и длительности песок постоянно перемещается вверх и вниз по склону, но не покидает подводный береговой склон. Такие миграции материала являются отличительной чертой профиля динамического равновесия, они многократно наблюдались

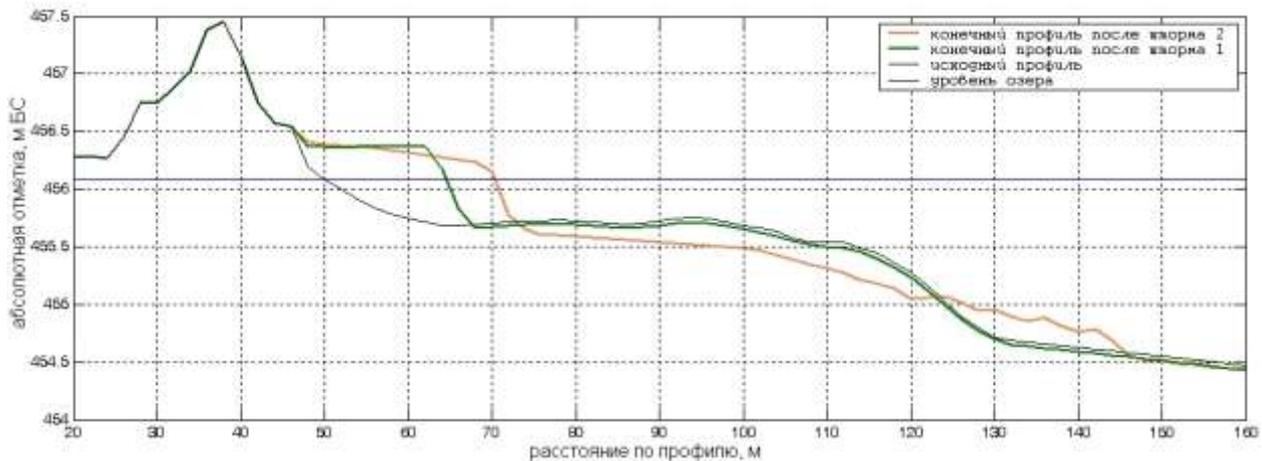


Рис. 9. Результаты математического моделирования перестроения расчетного профиля последовательно двух штормов – мощного (шторм 1) и умеренного (шторм 2). Параметры шторма 1: средняя высота волн – 2.39 м; средний период волн – 6.7 с.; продолжительность шторма – 12 ч. Параметры шторма 2: средняя высота волн – 0.87 м; средний период волн – 4.2 с.; продолжительность шторма – 24 ч. Абсолютная отметка уровня озера – 456.08 м

в натуральных условиях и широко описаны в специальной литературе [Леонтьев, 2001; Dean, 1993].

На рисунке 10 приведены результаты математического моделирования переформирования профиля мощным штормом 1, который уже упоминался выше, при повышении уровня озера на 1 м от реальной отметки. Даже в этом случае надводная часть профиля не будет полностью размыта, что также, наряду с детальным обследованием о. Ярки (описано в 3 главе), доказывает третье защищаемое положение об адаптации литодинамической системы бара к изменениям уровня оз. Байкал. Кроме того, достаточно ясно просматривается тенденция к смещению профиля назад (вглубь берега) и вверх в соответствие с правилом Бруна-Зенковича и моделью Дина-Маурмайера. Такая реакция островного бара на повышение уровня является типичной и широко наблюдается и на океанских берегах [Dean, 1993].

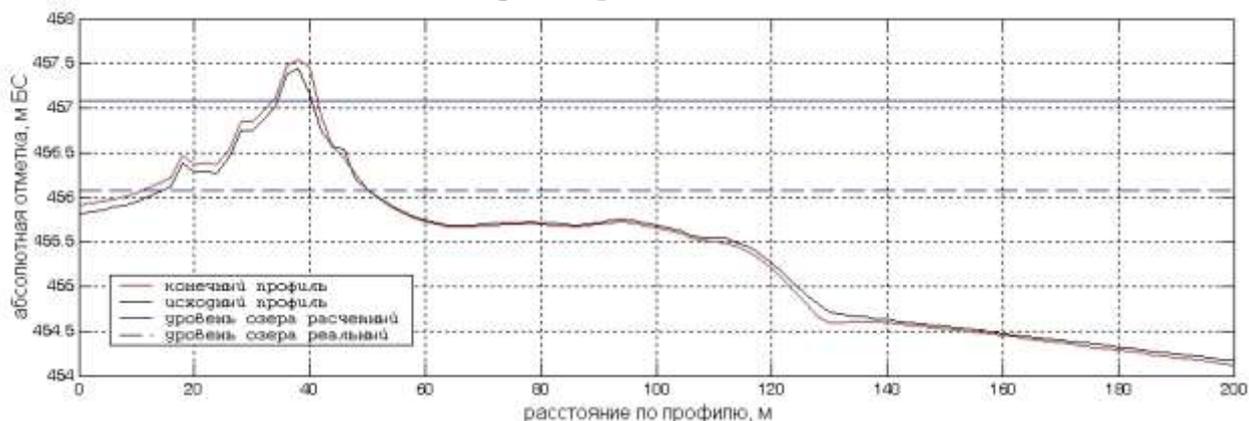


Рис. 10. Результаты математического моделирования переформирования расчетного профиля штормовым волнением при повышении уровня водоема. Параметры шторма: средняя высота волн – 2.39 м; средний период волн – 6.7 с.; продолжительность шторма – 12 ч; повторяемость – 1 раз в 25 лет. Расчетная абсолютная отметка уровня озера – 457.08 м

В разделе 4.3 приведен расчет вдольберегового перемещения материала в районе островного бара Ярки. Для оценки интенсивности вдольберегового переноса песка под воздействием волн использованы два метода расчета, учитывающие энергию подходящих к берегу волн. Первый метод разработан на основе теоретических положений [Лаппо и др., 1990], второй метод базируется на результатах натурных исследований, выполненных на песчаных берегах водохранилищ. По двум зависимостям получена качественно совпадающая картина переноса песка, за исключением западного участка, для которого получено преобладание переноса в восточном направлении, правда, в незначительном объёме. Вдоль озерного берега острова преобладает перенос песка на запад. При этом основной вклад в итоговый перенос приходится на волны южного направления. Максимальная мощность потока наносов, достигающая 16 тыс. м<sup>3</sup> в год, наблюдается у острова Миллионный. По мере продвижения на запад мощность потока наносов снижается, и вблизи устья р. Кичера объёмы миграций песка в противоположных направлениях оказываются практически равными. Приведенные факты говорят о том, что в прибрежной зоне островного бара существует два разнонаправленных потока наносов. Результаты моделирования представлены на рисунке ниже (рис. 11).

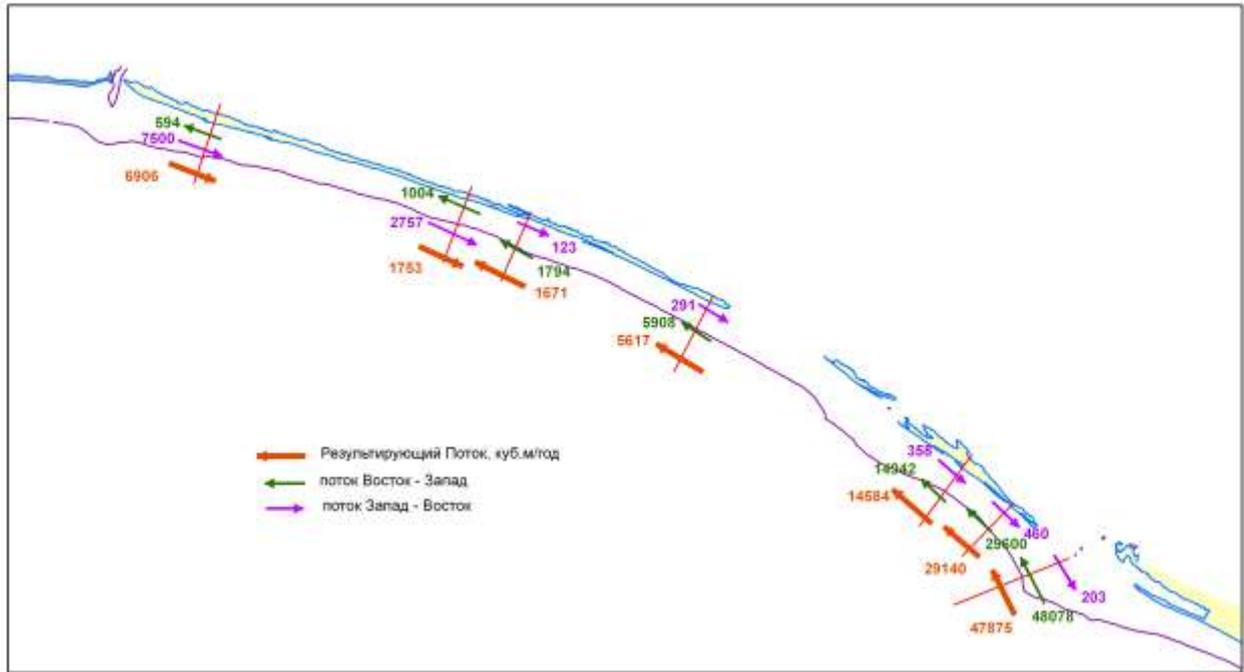


Рис. 11. Вдольбереговое перемещение наносов в районе островного бара Ярки

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе приведена оценка особенностей развития гидродинамических, морфодинамических и литодинамических процессов в береговой зоне островного бара Ярки (оз. Байкал) и проанализировано влияние литодинамического переноса материала на морфологию острова. В результате выполнения работы получены следующие выводы:

1. Проанализирована динамика о. Ярки на основе сравнения его современной конфигурации с материалами предыдущих исследований. За последние 60 лет площадь бара сократилась практически втрое.

2. Создана цифровая модель рельефа подводного берегового склона, на основании которой построены цифровые карты.

3. Составлена геоморфологическая карта островного бара Ярки на основе детальных топографических и гидрографических работ на участке берега от устья р. Кичера до устья р. Верхняя Ангара.

4. Проведена апробация и верификация комплекса методов математического моделирования береговых процессов на аккумулятивных берегах Новосибирского водохранилища. В результате выбраны следующие модели для исследования литодинамических процессов на о. Ярки: модель Дина для расчета профиля относительного динамического равновесия; модель штормовых деформаций И.О. Леонтьева; модель расчета вдольберегового перемещения наносов И.О. Леонтьева, CERC и ЛИТРАК; правило Брууна-Зенковича; модель Дина-Маурмайера для островных баров.

5. Рассчитаны теоретические профили относительного динамического равновесия для различных участков о. Ярки, проведен их анализ и сравнение с реальными профилями подводного берегового склона. Расположение теоретического профиля ниже реального свидетельствует об аккумулятивном

характере береговых процессов, а уменьшение угла наклона к западу говорит о большом содержании мелкой фракции на западных участках, что подтверждается натурными наблюдениями и анализом песчаного материала.

6. Методом математического моделирования выявлено два встречных потока наносов. Результирующая ёмкость вдольберегового перемещения наносов на запад в районе р. Верхняя Ангара составляет от 16 до 48 тыс. м<sup>3</sup> в год.

7. На основе модели штормовых деформаций рассчитано переформирование островного бара Ярки при различной мощности штормов с учетом переменного уровня озера. После штормов размывается подводный береговой склон и за счет поперечного движения материала вверх по склону происходит надстройка берега со стороны уреза. При увеличении уровня на 1 м наблюдается тенденция к смещению профиля назад в сторону лагуны, в соответствии с моделью Дина-Маурмайера и правилом Брууна-Зенковича.

8. Проведен прогноз береговых процессов в существующих условиях с учетом влияния переменного уровня озера. При подъеме уровня на 1 м происходит смещение берега на 110-130 м в сторону лагуны, что подтверждается натурными наблюдениями.

9. Проведена оценка особенностей развития гидродинамических, литодинамических и морфодинамических процессов в береговой зоне островного бара Ярки на основе расчетов и натурных наблюдений.

При изучении литодинамики береговой зоны островных баров северной части Байкала было выявлено два разнонаправленных потока наносов навстречу друг другу (от р. Верх. Ангары к р. Кичере и от р. Кичеры к р. Верх. Ангаре). Поток наносов, направленный в сторону Кичеры, является более мощным. Размыв берега обнаружен только на двух участках и обусловлен дефицитом наносов, которые формируют обширную отмель на сопряженных участках.

Смещение береговой линии вглубь Ангарского сора связано с различными факторами (сокращение стока речных наносов, антропогенное влияние, тектоническое погружение Верхнеангарской впадины и др.), но в большей степени разрушение берега и сокращение площади бара связано с изменением уровня Байкала, что доказано конкретными математическими зависимостями, представленными в данной работе.

Результаты выполненных исследований позволяют заключить, что при относительно стабильном в долговременном плане уровне режиме озера Байкал литодинамическая система бара до конца адаптируется к природным условиям, вызванным повышением среднего уровня озера после строительства Иркутской ГЭС.

## Список публикаций по теме диссертации

### *Статьи в рецензируемых изданиях по списку ВАК РФ:*

1. **Хомчановский А.Л.** Сравнительный анализ методов расчета профиля динамического равновесия / А.Л. Хомчановский, Е.А. Фёдорова, А.А. Лыгин, А.Ш. Хабидов // Геоморфология. – 2014. – № 3. – С. 39-42.
2. Лыгин Ан.А. Расчетные программные компоненты прототипа информационной системы мониторинга и прогнозирования динамики берегов / К.В. Марусин, А.Ш. Хабидов, А.А. Лыгин, Е.А. Федорова, **А.Л. Хомчановский** // Известия Алтайского государственного университета № 1/1 (77) – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2013. – С.106-111.
3. Хабидов А.Ш. Организация мониторинга береговой зоны и дна Новосибирского водохранилища / А.Ш. Хабидов, К.В. Марусин, Е.А. Федорова, **А.Л. Хомчановский**, А.А. Лыгин, Ан.А. Лыгин // Известия Алтайского государственного университета. – 2012. – № 3/1 (75). – С. 142-146.
4. **Хомчановский А.Л.** Развитие береговых процессов при повышении уровня водоема (на примере озера Байкал) / А.Л. Хомчановский // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2019. – №1 (41). – С. 99-107.

### *Статьи и тезисы в научных сборниках и трудах конференций:*

5. **Хомчановский А.Л.** Расчет профиля динамического равновесия для пляжа Новосибирского водохранилища / А.Л. Хомчановский, Е.А. Федорова, К.В. Марусин, А.Ш. Хабидов // Геосистемы: факторы развития, рациональное природопользование, методы управления: сборник научных статей по материалам II Международной научно-практической конференции посвященной 15-летию со дня основания филиала РГГМУ в г. Туапсе, 4-8 октября 2011 года / Рос. фонд фундамент. исслед., Рабочая группа «Морские берега» Совета РАН по проблемам Мирового океана, Фил. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та в г. Туапсе Краснодар. края. – Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2011. – С. 379-380.
6. **Khomchanovskiy, A.** Calculation of Equilibrium Beach Profile / A. Khomchanovskiy, E. Fedorova, K. Marusin, A. Khabidov // Baltic International Symposium (BALTIC), 2012 IEEE/OES – Topic(s): Communication, Networking & Broadcasting; Components, Circuits, Devices & Systems; Computing & Processing (Hardware/Software); Fields, Waves & Electromagnetics; Geoscience; Power, Energy & Industry Applications; Robotics & Control Systems; Signal Processing & Analysis Digital Object Identifier: 10.1109 / BALTIC. 2012.6249191 Publication Year: 2012, Page(s): 1 – 5 IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS
7. **Хомчановский А.Л.** Моделирование деформации профиля пляжа Новосибирского водохранилища / А.Л. Хомчановский, Е.А. Федорова, К.В. Марусин, А.Ш. Хабидов // Морские берега – эволюция, экология, экономика : Материалы XXIV Международной береговой конференции, посвященной 60-летию со дня основания Рабочей группы «Морские берега» (Туапсе, 1-6 октября 2012 г.): в 2 т. / Редакционная коллегия: Л.А. Жиндарев (отв. редактор), Ю.А. Леднова (зам. отв. редактора), Г.Г. Гогоберидзе, Е.А. Яйли, М.С.

Аракелов, С.А. Мерзаканов. – Краснодар: Издательский дом – Юг. Т. 1.– 2012.– С. 348-352.

8. **Хомчановский А.Л.** Численное моделирование изменения профиля пляжа северо-восточного побережья Новосибирского водохранилища в условиях сезонных колебаний уровня / А.Л. Хомчановский // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: тр. Междунар. науч.-практ. конф (28 мая – 30 мая 2013 г., Пермь) : в 3 т. Т.1: Управление водными ресурсами. Гидро- и геодинамические процессы / науч. ред. А.Б. Китаев, О.В. Ларченко; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2013. – С. 308-311.

9. **Khomchanovskiy, A.** Study of annual equilibrium beach evolution at coastal of man-made lake / A. Khomchanovskiy, A. Khabidov // Geomorphology and sustainability Abstracts Volume of 8th IAG International Conference (IAG) on Geomorphology – August 27th to 31st, 2013. / Т. 2: S18-S27. – P. 901.

10. Khabidov, A. Multiannual Variability of Novosibirsk Reservoir's Morphometry / A. Khabidov, E. Fedorova, K. Marusin, A. Khomchanovskiy // Geomorphology and sustainability Abstracts Volume of 8th IAG International Conference (IAG) on Geomorphology – August 27th to 31st, 2013. / Т. 1: S1 - S17. – P. 562.

11. **Хомчановский А.Л.** Морфологические изменения островного бара Ярки в связи с повышением уровня Байкала / А.Л. Хомчановский // Строение литосферы и геодинамика / Материалы XXVII Всероссийской молодежной конференции с участием исследователей из других стран (г. Иркутск, 22–28 мая 2017 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. – С. 248-294.

12. **Хомчановский А.Л.** Современная литодинамика островного бара Ярки / А.Л. Хомчановский // Арктические берега: путь к устойчивости: Материалы конференции / редакционная коллегия: Румянцева Е.А. (отв. редактор), Гогоберидзе Г.Г. (зам. отв. редактора), Князева М. А. – Мурманск: МАГУ, 2018. – С. 148-151.