
Работы молодых ученых

УДК 551.4.01:551.435.327

DOI: 10.31431/1816-5524-2019-1-41-99-107

**РАЗВИТИЕ БЕРЕГОВЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ПОВЫШЕНИИ УРОВНЯ ВОДОЕМА
(НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ)**

© 2019 А.Л. Хомчановский

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропаловск-Камчатский, 683006;
e-mail: khomscience@mail.ru*

В статье проанализировано влияние резкого повышения уровня оз. Байкал на изменение берегового бара Ярки, расположенного в северной части озера, сделан прогноз береговых процессов в условиях повышения уровня водоема. В ходе проведенных полевых исследований были измерены подводные и надводные топографические профили через береговой бар, отобраны и проанализированы на гранулометрический состав образцы песчаного материала, слагающего бар, построена цифровая модель рельефа, собраны материалы многолетних метеорологических наблюдений. Полученные фактические данные использованы при проведении численного моделирования переформирования профиля берегового склона во время максимальных штормов и при повышенном уровне водоема. При уровне оз. Байкал на момент экспедиционных работ 2013 г. профиль берега показал относительную стабильность даже при максимальных штормах. В случае подъема уровня водоема на 1 м профиль отступил «назад и вверх» в соответствии с моделью Дина-Маурмайера (Dean, Maugmeier, 1981) для береговых баров.

Ключевые слова: озеро Байкал, повышение уровня, размыв берега, численное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

После перекрытия в 1959 г. р. Ангара в 65 км от ее истока была построена Иркутская ГЭС, вследствие чего уровень воды в озере за 3 года поднялся на 1.2 м (Тржцинский и др., 2008). На оз. Байкал особенно пострадали аккумулятивные берега, в т.ч. островной бар Ярки, который находится в северной части озера. При первоначальном повышении уровня воды начался интенсивный размыв берегов и, соответственно, происходило сокращение площади бара: береговая линия отступила в сторону суши, в среднем, на 100–150 м, а в некоторых местах до 350 м и более (Пинегин и др., 1976). С 2001 г. в соответствии с постановлением Правительства РФ от 26.03.2001 № 234 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности» колебания уровня ограничены в следующих пределах: 456.0 м ТС (Тихоокеанская система высот) —

минимальная отметка, 457.0 м ТС — максимальная (Потемкина и др., 2012). До строительства Иркутской ГЭС площадь бара Ярки при низком уровне озера составляла 3.62 км², а в настоящее время она уменьшилась вдвое и не превышает 1.85 км² (Потемкина и др., 2012). В результате деградации островного бара, накопленные в лагуне, осадки поступят в прибрежные воды оз. Байкал, что приведет к их серьезному загрязнению.

В статье сделана попытка оценить современные особенности гидродинамических, морфодинамических и литодинамических процессов, контролирующих состояние берегов бара. В 2013 г. Институтом водных и экологических проблем СО РАН (ИВЭП СО РАН) проведено обследование бара, в результате чего получено современное положение береговой линии. По результатам исследований построена цифровая модель рельефа местности, проведены расчеты переформирования рельефа бара и под-

водного берегового склона методом численного моделирования при разных гидрометеорологических параметрах в условии изменения уровня.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Островной бар Ярки расположен на северном окончании оз. Байкал (рис. 1). Вместе с другими аккумулятивными образованиями — о. Миллионный, Дагарской и Нижнеангарской косами, бар Ярки отделяет от основной акватории оз. Байкал мелководную лагуну — зал. Ангарский Сор. Между Нижнеангарской косой и островным баром Ярки в озеро впадает р. Кичера, а между о. Миллионный и Дагарской косой — р. Верхняя Ангара, вторая по водоносности на Байкале.

Повышение уровня оз. Байкал после создания Иркутской ГЭС привело к усилению абразии берегов, началу размыва ряда аккумулятивных форм, формирование которых происходило длительное время при естественном уровне воды в озере (Пинегин и др., 1976; Рогозин, 1993).

Природные процессы, которые активизировались в результате антропогенного повышения уровня Байкала, в полной мере затронули и рассматриваемый объект. Островной бар Ярки за прошедшее после создания Иркутской ГЭС время претерпел существенную трансформацию (Хомчановский, 2017). До начала 60-х годов прошлого века островной бар представлял собой единый остров, протянувшийся от устья р. Кичера до Среднего устья р. Верхняя Ангара (Атлас ..., 1977).

По данным топографической съемки 1962 г. островной бар Ярки имел основные морфометрические характеристики, приведенные в табл. 1. По состоянию на август 2013 г. островной бар Ярки при том же уровне, состоял из двух фрагментов: большого западного и малого восточного, разделенных прораном протяженностью 1950 м. Подавляющая часть этого прорана занята отмелью с глубинами менее 1 м шириной 100–150 м, частично осушаемой при средних и низких уровнях воды. Информация о скорости и направлении ветра в этом районе приведена в табл. 2.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе работ проведены комплексные исследования, включающие измерение топографических профилей на ключевых участках, промерные гидрографические работы, отбор песчаного материала для гранулометрического анализа, сравнение топографических карт разных годов. Основной объем фактического материала нами был получен при проведении экспедиционных исследований в северной части оз. Байкал (островной бар Ярки, о. Миллионный, Нижнеангарская коса, Дагарская коса) в 2013 г. Для получения топографических данных использовался GPS приемник Hi Target K5 (погрешность 0.15–0.2 м) и тахеометр Leica TS 06. При помощи высокоточного эхолота Lowrance LMS-480 проведена съемка рельефа дна прилегающей акватории островного бара Ярки и на основе этих данных построена цифровая модель рельефа. Составление цифровой карты пространственного

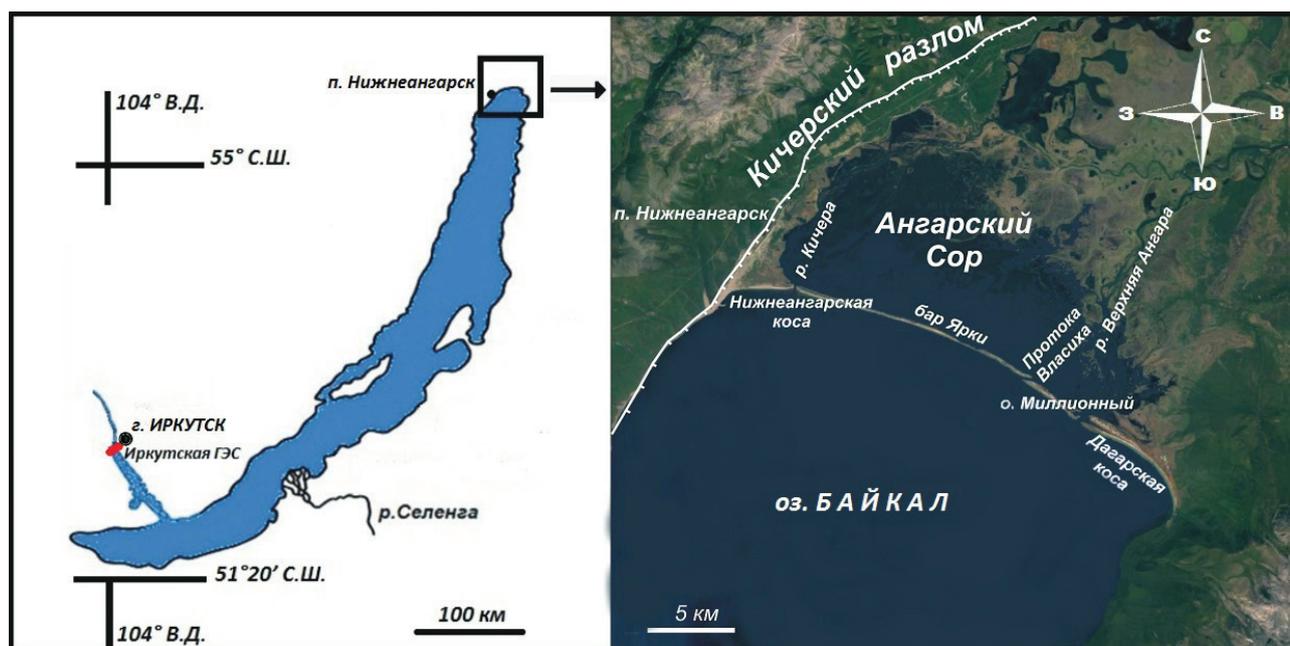


Рис. 1. Район исследования.

Fig. 1. Study site.

Таблица 1. Основные морфометрические параметры острова Ярки по данным топографической съемки 1962 г. и 2013 г. Отметка уровня оз. Байкал — 456.6 м ТС.

Table 1. The main morphometric parameters of Yarki Island based on the 1962 and 2013 surveys. Lake Baikal level — 456.6 m TS.

Характеристика	Год съемки		
	1962	2013	
		Западный Фрагмент	Восточный фрагмент
Длина по геометрической осевой линии, км	14.24	10.80	1.21
Площадь, га	297.68	102.44	9.07
Ширина средняя, м	209	95	75

Таблица 2. Средняя продолжительность ветра, в часах, по скоростям и направлениям за период открытой воды на акватории озера Байкал в районе островного бара Ярки (по данным метеостанции Нижнеангарск).

Table 2. The average wind duration (in hours) for the period of open water in Lake Baikal within the Yarki sandbar (Nizhneangarsk weather station).

Скорость ветра, м/с		Направление, румб (азимут в градусах)			
Интервал	Значение	ЮВ (135)	Ю (180°)	ЮЮЗ (202,5°)	З (270°)
6–7	7	4.78	30.90	44.51	11.40
8–9	9	–	6.99	16.55	2.21
10–15	15	–	3.31	12.51	1.84
15–20	20	–	–	3.31	–

смещения островного бара Ярки после подъема уровня оз. Байкал в результате строительства Иркутской ГЭС и модели рельефа проводилось в программном комплексе ArcGIS 9.2 (ESRI Inc.). Для прогноза эволюции профиля подводного берегового склона было выполнено численное моделирование. Для моделирования использовалась программа CROSS-P, разработанная в ИВЭП СО РАН, которая предназначена для численного моделирования локальных размывов по профилю берега под действием ветровых волн с заданным шагом по пространству и по времени.

Реакция профиля аккумулятивного берега на повышение уровня моря (водоема) описывается правилом Зенковича-Брууна, согласно которому профиль берега будет сдвигаться как единое целое в сторону суши или в сторону моря вслед за ходом уровня (его повышением или понижением) (Зенкович, 1962; Bruun, 1988).

Следует подчеркнуть, что в данной статье рассматриваются не циклические колебания уровня, а его «одномоментное» изменение и дальнейшее сохранение новой отметки на исторически длительное время. Помимо изменения уровня в связи с работой ГЭС, последний случай может реализоваться также при вертикальной подвижке по Кичерскому разлому, при которой территория с Ангарским Сором будет относительно опущена, то есть уровень воды относительно поднят.

Согласно правилу Зенковича-Брууна смещение берега прямо пропорционально изменению уровня водоема ΔZ_o и обратно пропорционально

среднему уклону активной части профиля подводного берегового склона:

$$\Delta X_c = \frac{\Delta Z_o}{S}, \quad (1)$$

где ΔX_c — смещение берега; ΔZ_o — изменение уровня водоема; S — средний уклон активной части профиля.

Р.Д. Халлермайер (Hallermeier, 1981) связывает глубину замыкания (предельная глубина, до которой происходит перемещение наносов, а, следовательно, и текущие колебания формы профиля) с параметрами экстремального волнения вне береговой зоны («на глубокой воде») продолжительностью не более 12 часов в год:

$$D_c = 2.3H_{S_\infty} - 10.9 \frac{H_{S_\infty}^2}{L_\infty}, \quad (2)$$

где H_{S_∞} — высота волн обеспеченностью 13% в системе, называемая также высотой «значимой» или «существенной» волны (significant wave height), на глубокой воде; L_∞ — длина волны на глубокой воде. Под «системой» волн подразумевается их совокупность, наблюдаемых в данной точке за период одного срока наблюдения в 20–30 минут или из 100 подряд идущих волн (в отличие от режима волнения, подразумевающего параметры волн, возможные 1 раз в «N» лет, т.е. за многолетний период).

Согласно правилу Зенковича-Брууна при подъеме уровня водоема материал, смываемый с надводной части профиля, отлагается в нижней части склона (рис. 2а). Для береговых склонов,

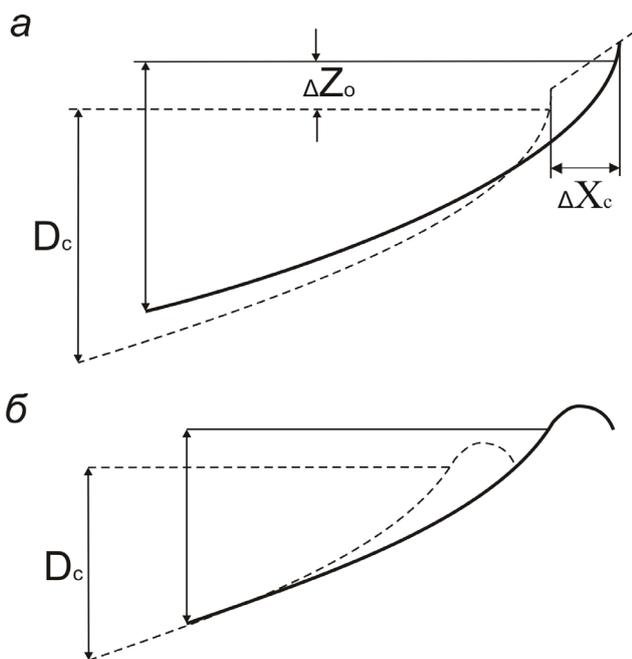


Рис. 2. Эволюция профиля берега при повышении уровня моря: *a* — типичный случай — размыв надводной части и перемещение материала вниз по склону; *б* — очень отмелый берег — перемещение материала вверх по склону. ΔZ_0 — повышение уровня; ΔX_c — отступление берега; D_c — глубина замыкания (мористая граница активной части профиля) (Хомчановский, 2018).

Fig. 2. The evolution of the shore profile with sea level rise: *a* — typical situation — erosion of the surface part and the movement of material down the slope; *b* — shallow shore — movement of material up the slope. ΔZ_0 — level rise; ΔX_c — shore retreat; D_c — depth of closure (the location where the profile changes little through time, delineating the area where sediment in the offshore is no longer exchanged with the beach) (Khomchanovskii, 2018).

где наклон поверхности затопляемой суши меньше угла наклона профиля динамического равновесия, характерен иной тип переформирования берега, описанный Ю.С. Долотовым (1989), а также П.Д. Кауэллом с соавторами (Cowell et al., 1995). В этом случае при повышении уровня воды материал перемещается вверх по склону и аккумулируется в виде берегового вала или барьера, продвигающегося вглубь суши по мере затопления берега (рис. 2б). Указанные авторы выделяют также промежуточный тип реакции берега на подъем уровня водоема, при котором одна часть материала накапливается вверху, а другая — в нижней части профиля.

В работе (Dean, Maurmeyer, 1981) авторы модернизировали общее правило Зенковича-Брууна для островного бара. 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» (рис. 3). В качестве основного механизма, обеспечивающего подачу материала на надводную часть бара для увеличения его абсолютных отметок, авторы рассматривают явление перехлестывания волн при особо мощных штормах (overwash). Величина отступления островного бара при росте уровня моря связана с основными параметрами его береговой зоны, как со стороны моря, так и со стороны лагуны, следующим соотношением (рис. 3):

$$R = S \frac{L_o + W + L_l}{h_o - h_l}, \tag{2}$$

где R — величина смещения бара вглубь суши; S — подъем уровня водоема; W — ширина

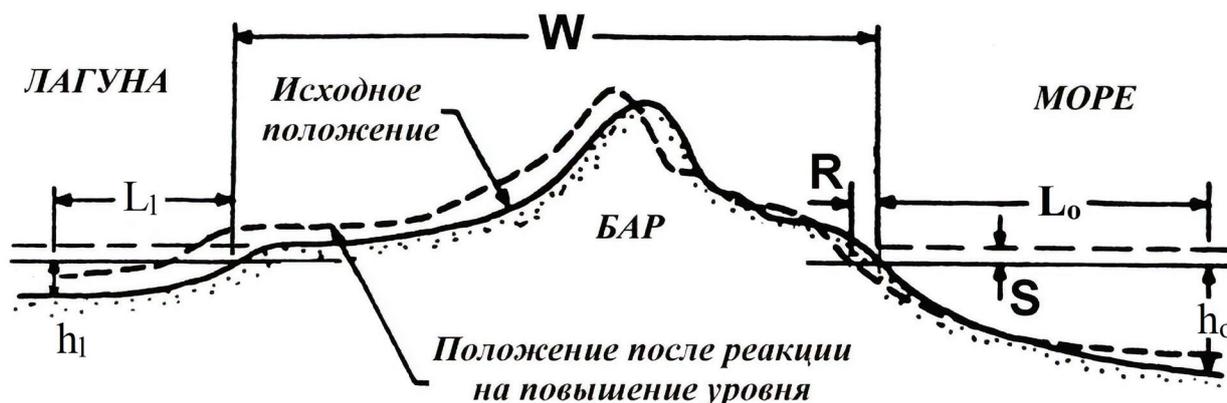


Рис. 3. Реакция островного бара на повышение уровня водоема (Dean, Maurmeyer; 1981). R — смещение бара; S — подъем уровня моря; W — ширина надводной части бара; L_o , L_l — длина активной части профиля со стороны моря и лагуны; h_o , h_l — глубина замыкания со стороны моря и лагуны.

Fig. 3. Sandbar reaction to the increased level of the reservoir (Dean, Maurmeyer; 1981). R — shoreline retreat; S — sea level rise; W — bar width; L_o , L_l — the length of the active profile from the shoreline to depth of closure: seaward (L_o) and lagoonward (L_l); h_o , h_l — depth of closure: seaward (h_o) and lagoonward (h_l).

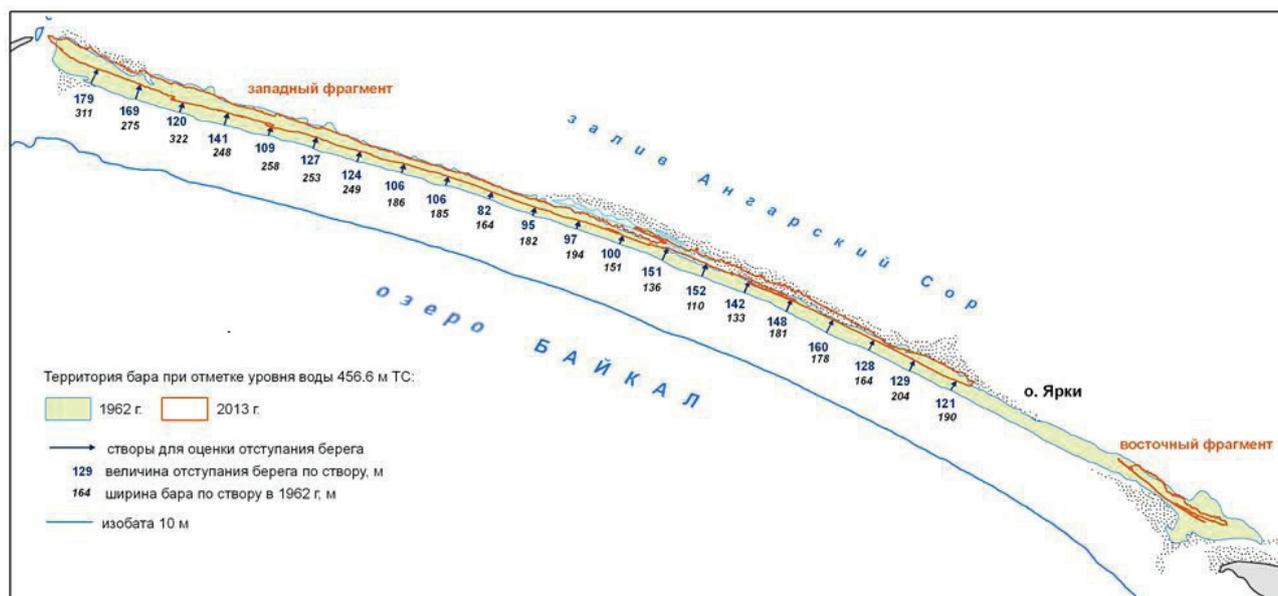


Рис. 4. Пространственное смещение островного бара Ярки после подъема уровня озера Байкал в результате строительства Иркутской ГЭС, 1962–2013 гг.

Fig. 4. Spatial displacement of the sandbar Yarki after the rise of Lake Baikal level caused by the construction of the Irkutsk Hydroelectric Power Station in 1962–2013.

надводной части бара; L_0 — длина активной части профиля со стороны моря; L_1 — длина активной части профиля со стороны лагуны; h_0 — глубина замыкания со стороны моря; h_1 — глубина замыкания со стороны лагуны.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формула (2) дает более значительное отступление берега, чем классическое правило Зенковича-Бруна (1), поскольку размываемый материал расходуется не только на надстройку профиля со стороны моря, но также идет на повышение отметок надводной части бара и берегового склона в лагуне.

На рис. 4 показано, что за последние 50 лет действительно произошло пространственное смещение островного бара «назад» — вглубь зал. Ангарский Сор. Средняя величина этого смещения за период 1962–2013 гг. составила 128 м (Хомчановский, 2017).

На основе данных о ветровом режиме (Атлас ..., 1977) по формуле (2) были рассчитаны глубина замыкания со стороны основной акватории озера (11 м) и длина активной части профиля (700 м). Со стороны лагуны глубина замыкания принята равной 1 м, а длина активной части профиля — 200 м. Тогда по формуле (2) смещение бара при повышении уровня озера на 1 м составляет 110 м. Это близко к результатам, полученным нами по данным прямых наблюдений. Следовательно, реальное смещение бара довольно хорошо описывается формулой Дина-Маурмайера (Dean, Maurmeyer, 1981).

Методами численного моделирования также была исследована устойчивость современного профиля береговой зоны островного бара Ярки к воздействию штормовых волн со стороны основной акватории оз. Байкал. Для этой цели использовалась численная модель штормовых деформаций профиля песчаного берега, разработанная И.О. Леонтьевым и реализованная, для практического использования, в программе CROSS-P, созданной в ИВЭП СО РАН (Леонтьев, 2001; Хабидов и др., 2009). В качестве объекта исследований был выбран поперечный профиль берега, находящийся в самом узком месте наибольшего из островов бара (рис. 5). Ширина надводной части профиля на момент геодезической съемки (11 августа 2013 г.) составляла 32 м, а максимальное возвышение над урезом воды — 1.5 м.

Особенностью профиля является наличие обширного мелководья со стороны озера. Так, изобата 2 м располагается на расстоянии 165 м от уреза, изобата 5 м — на расстоянии в 470 м, а изобата 10 м — на расстоянии в 800 м. Как показали результаты выполненных нами промеров, это характерно для всей береговой зоны бара Ярки со стороны оз. Байкал. По результатам гранулометрического анализа проб песка, медианная крупность формирующего профиль материала составляет 0.25 мм (табл. 3). Эта величина использовалась при проведении численного моделирования.

В качестве расчетного волнового воздействия мы приняли шторм, генерируемый южным ветром со скоростью 20 м/с. Повторя-

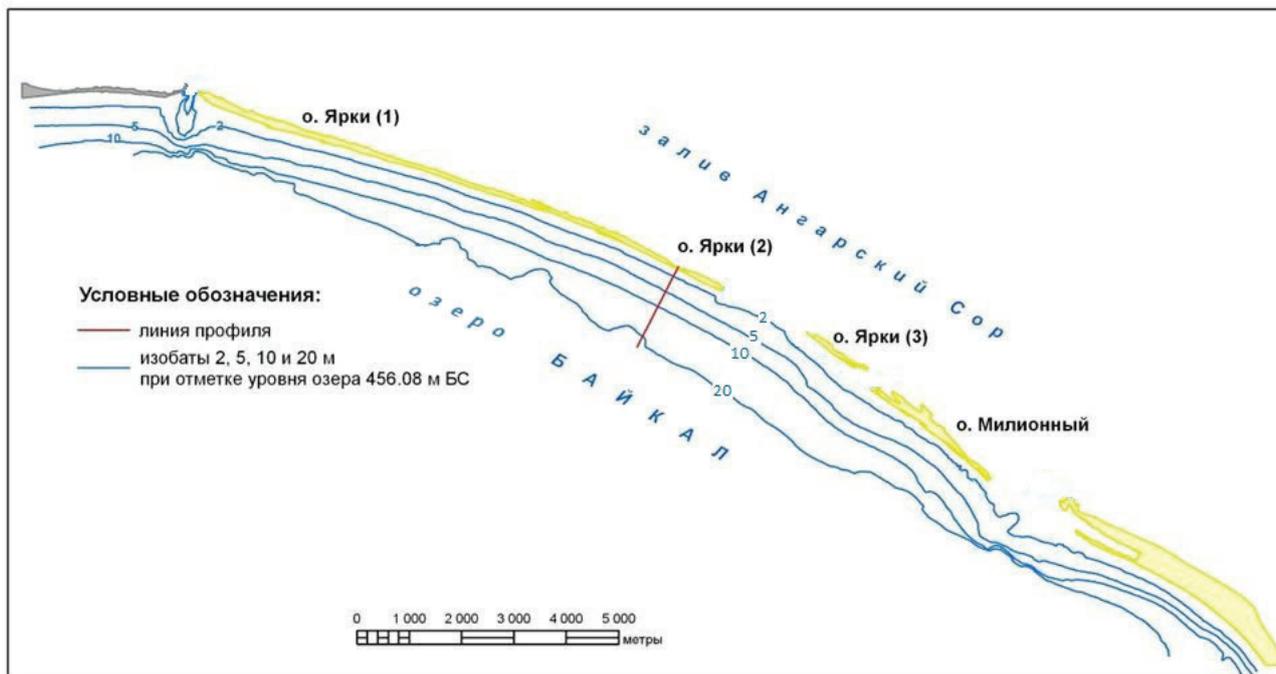


Рис. 5. Местоположение расчетного профиля.

Fig. 5. Location of the calculated profile.

Таблица 3. Состав пляжевого материала на островах Ярки.

Table 3. The composition of the beach material on Yarki Island.

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 _{50%} , мм
Фрагмент 1	64.5	34.9	0.6	0.24
Фрагмент 2	45.2	54.3	0.6	0.25
Фрагмент 3	40.3	59.0	0.7	0.26
Остров Миллионный	15.5	79.9	4.6	0.34

емость такого шторма составляет 1 раз в 25 лет (Атлас ..., 1977). Для моделирования приняты следующие параметры волн вне береговой зоны (на глубине 100 м): средняя высота волн — 2.39 м; средний период — 6.7 с. Максимальная продолжительность такого шторма составляет 6 ч (Атлас ..., 1977). Однако, для «ужесточения» условий продолжительность шторма была увеличена вдвое, т.е. до 12 ч. Моделирование проводилось для современного уровня озера 456 м ТС. 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. Таким образом, шторм привел не к разрушению, а к надстройке надводной части бара. Этот, на первый взгляд, неожиданный результат, как раз и обусловлен наличием широкой мелководной зоны, по которой разрушающаяся волна распространяется в виде бара с преобладающим переносом водных

масс, а, следовательно, и рыхлого материала, в сторону берега. Однако, отложенный в приурезовой зоне песок не останется там навсегда. Последующие шторма меньшей силы размоют его и вновь распределят по профилю, или, он будет переотложен на мелководье в виде вала, который затем также будет размыв и т.д. Под действием штормов разной силы и длительности песок постоянно перемещается вверх и вниз по склону, но не покидает профиль. Иллюстрацией этого процесса служат результаты численного моделирования, приведенные на рис. 6. Такие миграции материала являются отличительной чертой профиля динамического равновесия, они многократно наблюдались в природных условиях и широко описаны в литературе (Леонтьев, 2001; Хабидов и др., 2009).

В ходе работы была исследована также возможная реакция профиля бара на штормовое воздействие при общем повышении уровня водоема на 1 м (рис. 7). По данным

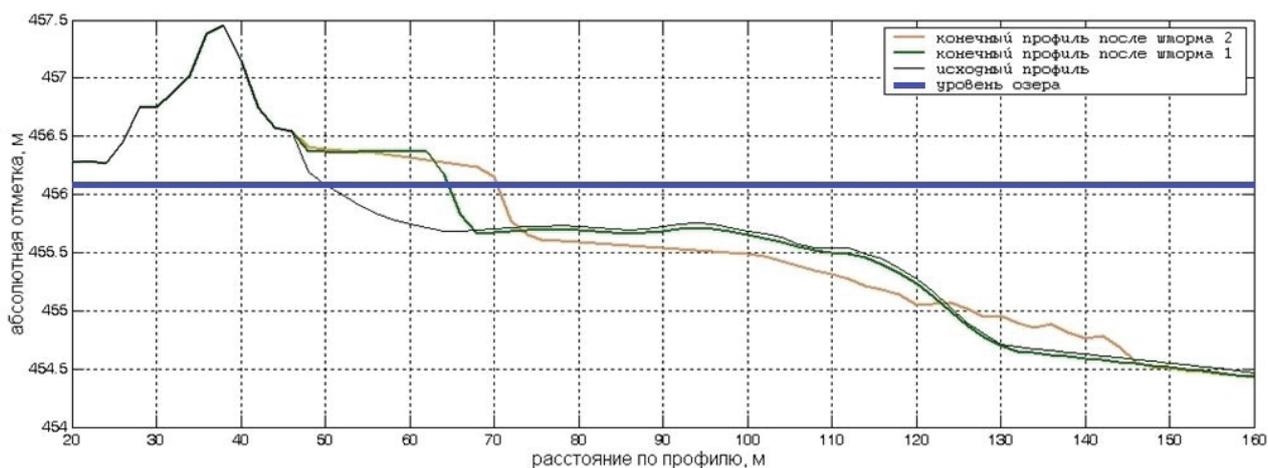


Рис. 6. Результаты математического моделирования переформирования расчетного профиля последовательностью двух штормов — мощного (шторм 1) и умеренного (шторм 2). Параметры шторма 1: средняя высота волн — 2.39 м; средний период — 6.7 с.; продолжительность шторма — 12 ч. Параметры шторма 2: средняя высота волн — 0.87 м; средний период — 4.2 с.; продолжительность шторма — 24 ч. Абсолютная отметка уровня озера — 456.08 м.

Fig. 6. The results of numerical simulation of the profile reformation using a sequence of two storms — powerful (storm 1) and moderate (storm 2). Parameters of storm 1: average wave height — 2.39 m; average wave period — 6.7 sec.; storm duration — 12 h. Parameters of storm 2: average wave height — 0.87 m; average wave period — 4.2 sec.; storm duration — 24 h. Lake elevation — 456.08 m.

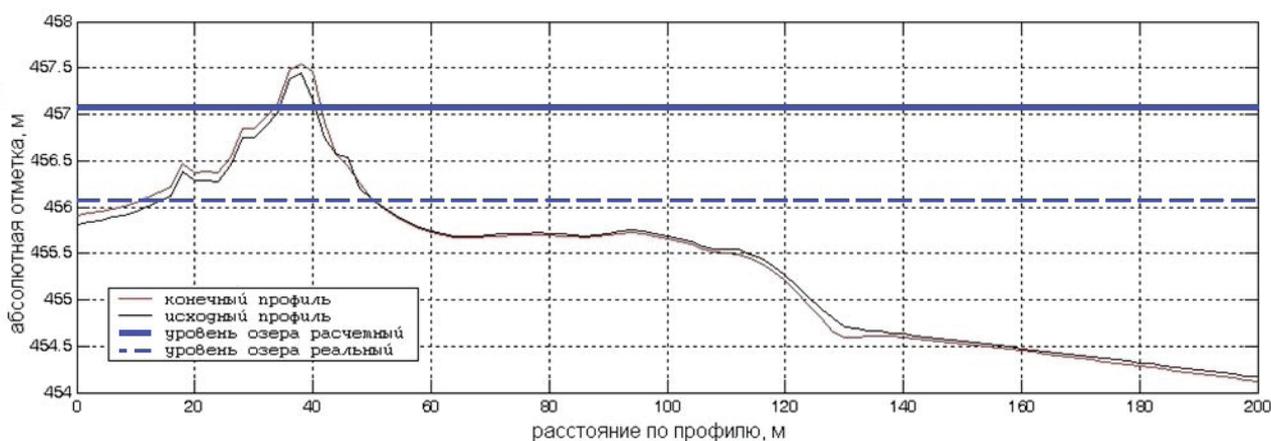


Рис. 7. Результаты математического моделирования переформирования расчетного профиля штормовым волнением при повышении уровня водоема. Параметры шторма: средняя высота волн — 2.39 м; средний период — 6.7 с.; продолжительность шторма — 12 ч; повторяемость — 1 раз в 25 лет. Расчетная абсолютная отметка уровня озера — 457.08 м.

Fig. 7. The results of numerical simulation of the profile reformation using storm waves with lake level rise. Parameters of the storm: average wave height — 2.39 m; average wave period — 6.7 sec.; storm duration — 12 h. Probability of accidents once in 25 years. Lake elevation — 457.08 m.

моделирования оказалось, что даже в этом случае, надводная часть профиля не будет полностью размыва. Кроме того, достаточно ясно просматривается тенденция к смещению профиля назад и вверх в соответствии с правилом Зенковича-Бруна. Полученный результат хорошо согласуется с фактическими данными (Хомчановский, 2018). Такая реакция островного бара на повышение уровня водоема является типичной и широко наблюдается и на океанских берегах (Dean, Dalrymple, 1993).

Следует отметить, что в геологическом прошлом подобные резкие изменения уровня оз. Байкал уже случались, например, во время подвижек по Кичерскому разлому (Базаров, 1986; Воробьева и др., 2013; Смекалин и др., 2007; Arzhannikov et al, 2018). Так как разлом все еще активен, то подобные события можно ожидать и в будущем, поэтому оценка возможных последствий и прогноз развития аккумулятивных берегов Байкала является актуальной задачей.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований впервые был выполнен анализ эволюции островного бара Ярки на фоне изменения уровня оз. Байкал. Сравнение ретроспективных данных с результатами изучения бара Ярки в 2013 г. показывает, что за 50 лет площадь бара сократилась более чем наполовину (62%), а среднее смещение береговой линии составило 128 м. Изменение морфологических параметров в первую очередь связано с повышением уровня Байкала после строительства Иркутской ГЭС. Фактическое отступление берега хорошо согласуется с проведенными нами численными расчетами по формуле (2) Дина-Маурмайера, являющейся частным случаем правила Зенковича-Брууна для островных баров.

Необходимо отметить, что рассмотренный здесь и доказанный численным моделированием механизм динамики береговых баров в условиях относительного повышения уровня водоема согласуется с исследованиями, проведенными на Каспийском море (Бадюкова, 2018). Береговые бары сохраняют аккумулятивный облик несмотря на активный размыв подводного берегового склона. Материал накапливается в приурезовой зоне, а также перебрасывается в лагуну, за счет чего и происходит движение «назад и вверх». Такая ситуация описана Е.Н. Бадюковой (2018) для Каспийского моря, где при подъеме уровня моря на 2.5 м берег отступил почти на 700 м, при этом оставаясь аккумулятивным. Подобный процесс мы можем наблюдать и на береговом баре Ярки.

Результаты численного моделирования подтвердили, что при существующем уровненом режиме литодинамическая система бара Ярки является стабильной. Однако, при резком повышении уровня водоема в связи с эксплуатацией ГЭС или в результате тектонической подвижки по Кичерскому разлому, и сохранении уровня в таком положении на долгое время островной бар может полностью исчезнуть.

Работа выполнена в рамках НИР «Исследования 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» (НИР-12-14), руководитель А.Ш. Хабидов. Подготовка публикации выполнена в рамках темы НИР № 0282-2018-0019 ИВиС ДВО РАН.

Список литературы

Атлас волнения и ветра озера Байкал. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 117 с. [Atlas volneniya i vetra ozera Bajkal. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 117 p. (in Russian)].

Бадюкова Е.Н. Лагунно-трансгрессивные террасы на низменных побережьях морей // Арктические берега: путь к устойчивости: Материалы XXVII Международной береговой конференции. Мурманск. 2018. С. 24–27 [Badyukova E.N. Lagoon-transgressive terraces on lowland coastal plains // Arkticheskie berega: put' k ustojchivosti: Materialy XXVII Mezhdunarodnoj beregovej konferencii. Murmansk. 2018. P. 24–27 (in Russian)].

Базаров Д.Б. Кайнозой Прибайкалья и западного Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1986. 182 с. [Bazarov D.B. Kajnozoi Pribajkal'ya i zapadnogo Zabajkal'ya. Novosibirsk: Nauka, 1986. 182 p. (in Russian)].

Воробьева Г.А., Горюнова О.И. Палеоуровни Байкала во второй половине позднего неоплейстоцена и голоцене (по геоархеологическим данным) // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Геоархеология. Этнология. Антропология. 2013. № 1(2). С. 3–29 [Vorob'eva G.A., Goryunova O.I. Paleourovni Bajkala vo vtoroj polovine pozdnego neoplejstocena i golocene (po geoarheologicheskim dannym) // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geoarheologiya. Etnologiya. Antropologiya. 2013. № 1(2). P. 3–29 (in Russian)].

Долотов Ю.С. Динамические обстановки прибрежно-морского рельефообразования и осадконакопления. М.: Наука, 1989. 270 с. [Dolotov Yu.S. Dinamicheskie obstanovki pribrezhno-morskogo rel'efoobrazovaniya i osadkonakopleniya. M.: Nauka, 1989. 270 p. (in Russian)].

Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с. [Zenkovich V.P. Osnovy ucheniya o razviii morskikh beregov. M.: Izd-vo AN SSSR, 1962. 710 p. (in Russian)].

Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с. [Leont'ev I.O. Pribrezhnaya dinamika: volny, techeniya, potoki nanosov. M.: GEOS, 2001. 272 p. (in Russian)].

Пинегин А.В., Rogozin A.A., Лещиков Ф.Н. и др. Динамика берегов оз. Байкал при новом уровненом режиме. М.: Наука, 1976. 88 с. [Pinegin A.V., Rogozin A.A., Leshchikov F.N. et al. Dinamika beregov oz. Bajkal pri novom urovennom rezhime. M.: Nauka, 1976. 88 p. (in Russian)].

Потемкина Т.Г., Ярославцев Н.А., Петров В.А. Гидролого-морфологические особенности устьевой области р. Верхняя Ангара // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 4. С. 367–376 [Potemkina T.G., Yaroslavtsev N.A., Petrov V.A. Hydrological and morphological features of the Upper Angara mouth area // Water Resources. 2012. V. 39. № 4. P. 366–374. <https://doi.org/10.1134/S0097807812030086>].

Рогозин А.А. Береговая зона Байкала и Хубсугула. Морфология, динамика и история развития. Новосибирск: Наука, 1993. 168 с. [Rogozin A.A. Beregovaya zona Bajkala i Hubsugula. Morfologiya,

- dinamika i istoriya razvitiya. Novosibirsk: Nauka, 1993. 168 p. (in Russian)].
- Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Имаев В.С. и др.* Палеосейсмогеологические исследования зоны Кичерского разлома (Северное Прибайкалье) // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 26. № 2. С. 82–92 [*Smekalin O.P., Chipizubov A.V., Imaev V.S. et al.* Paleoseismological investigation of the Kichera Fault Zone in the northern Baikal region // Russian Journal of Pacific Geology. 2007. V. 1. № 2. P. 176–185. <https://doi.org/10.1134/S1819714007020066>].
- Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А., Шипек Т. и др.* Техногенез и переработка берегов северного Байкала // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеоэкология, геокриология. 2008. № 2. С. 158–167 [*Trzhcinskij YU.B., Kozyreva E.A., Shchipek T. et al.* Tekhnogenez i pererabotka beregov severnogo Bajkala // Geoehkologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeohkologiya, geokriologiya. 2008. № 2. P. 158–167 (in Russian)].
- Хабидов А.Ш., Леонтьев И.О. и др.* Управление состоянием берегов водохранилищ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 239 с. [*Khabidov A.SH., Leont'ev I.O. et al.* Upravlenie sostoyaniem beregov vodohranilishch. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2009. 239 p. (in Russian)].
- Хомчановский А.Л.* Морфологические изменения островного бара Ярки в связи с повышением уровня Байкала // Стрoение литосферы и геодинамика: Материалы XXVII Всероссийской молодежной конференции с участием исследователей из других стран (г. Иркутск, 22–28 мая 2017 г.). Институт земной коры СО РАН. Иркутск. 2017. С. 294 [*Khomchanovskiy A.L.* Morfologicheskie izmeneniya ostrovnogo bara Yarki v svyazi s povysheniem urovnya Bajkala // Stroenie litosfery i geodinamika: Materialy XXVII Vserossijskoj molodezhnoj konferencii s uchastiem issledovatelej iz drugih stran (g. Irkutsk, 22–28 maya 2017 g.). Institut zemnoj kory SO RAN. Irkutsk. 2017. P. 294 (in Russian)].
- Хомчановский А.Л.* Современная литодинамика островного бара Ярки // Арктические берега: путь к устойчивости: Материалы XXVII Международной береговой конференции. Мурманск. 2018. С. 148–151 [*Khomchanovskiy A.L.* Modern litodynamics of the coastal bar Yarki // Arkticheskie berega: put' k ustojchivosti: Materialy XXVII Mezhdunarodnoj beregovoj konferencii. Murmansk. 2018. P. 148–151 (in Russian)].
- Arzhannikov S.G., Ivanov A.V., Arzhannikova A.V. et al.* Catastrophic events in the Quaternary outflow history of Lake Baikal // Earth-Science Reviews. 2018. V. 177. P. 76–113.
- Bruun P.* The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usage // Journal of Coastal Research, 1988. V. 4. № 4. P. 627–648.
- Cowell P.J., Roy P.S., Jones R.A.* Simulation of large-scale coastal change using a morphological behavior model // Marine Geology. 1995. V. 126. P. 45–61.
- Dean R.G., Maurmeyer E.M.* Models for Beach Profile Response // CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion. P.D. Komar ed. Boca Raton, Fl.: Coastal Research Center Press, 1983. 305 p.
- Dean R.G., Dalrymple R.A.* Coastal Processes with Engineering Applications. University of Florida, Gainesville, Fl, 1993. 416 p.
- Hallermeier R.G.* A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate // Coastal Engineering, 1981. V. 4. P. 253–277.

DEVELOPMENT OF COASTAL PROCESSES WITH THE INCREASE OF WATER LEVEL: A CASE STUDY FOR LAKE BAIKAL

© 2019 A.L. Khomchanovskii

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 683006;
e-mail: khomscience@mail.ru*

The article provides estimations of the impact from abrupt increase in water level in Lake Baikal on coastal processes of bar Yarki (north part of Lake Baikal). The author has made a forecast of coastal processes of island bar under the current conditions and created a digital elevation model and profiles of the nearshore. Relationship between sea level rise and shoreline retreat are considered. Numerical simulation of evolution the beach profile under different conditions was carried out. The construction of hydroelectric power station in Irkutsk is the main reason that caused the change in morphological parameters of the bar. At the level of Lake Baikal at the time of expeditionary works in 2013, the shore profile showed relative stability even with maximum storms. When the lake level rose by 1 metre, the profile retreated “back and up” in compliance to the Dean-Maurmeier model (Dean, Maurmeyer, 1981) for coastal bars.

Keywords: Lake Baikal, increased level, coastal erosion, numerical.