А.Л. Хомчановский

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
khomscience@mail.ru*

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕРЕГОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация. В статье рассмотрен ряд подходов при моделировании береговых процессов на Новосибирском водохранилище и оз. Байкал. Профиль относительного динамического равновесия рассчитывался при помощи методики из свода правил СП 32-103-97 «Проектирование морских берегозащитных сооружений», американской программы SBEACH и формулы Брууна-Дина. Моделирование переформирования поперечного профиля берега ветровым волнением с учетом колебания уровня водоемов проводилось в программах SBEACH и CROSS-P. При моделировании вдольберегового транспорта наносов использовались модель Леонтьева и программа LITPACK. Все полученные данные сравнивались с данными геолого-геоморфологических исследований, в ходе проведения которых были измерены подводные и надводные топографические профили, отобраны и проанализированы на гранулометрический состав образцы песчаного материала, построены цифровые модели рельефа, собраны материалы многолетних метеорологических наблюдений. Сделаны выводы о возможных дальнейших перспективах математического моделирования для исследования береговых процессов. В итоге проведенных численных экспериментов и анализа материала, полученного путем экспедиционных геолого-геоморфологических исследований сделан вывод, что результаты математического моделирования показали хорошую сопоставимость с другими методами исследований, а также с натурными данными, полученными в результате проведенных экспедиций. Математический подход к изучению вопроса о развитии береговых процессов и переработки берегов позволяет с количественной точки зрения изучить динамику рельефа береговой зоны и дает возможность подойти к важнейшему вопросу прогноза развития берегов. Благодаря этому становится возможным минимизировать риски и негативные последствия экзогенных геологических процессов. Помимо стандартных прикладных задач (например, для проектирования и разработки морских берегозащитных сооружений) в которых используется численное моделирование, этот подход находит применение и при решении задач связанных с фундаментальными научными исследованиями — например, моделируются эрозионные и аккумулятивные процессы и перемеще-

ние осадков во время цунами, перестройка профилей равновесия после резких поднятий или опусканий относительного уровня океана в связи с косейсмическими вертикальными деформациями на побережьях, расположенных вдоль зон субдукций и т.д.

Ключевые слова: отступление берега, математическое моделирование, береговые процессы, Новосибирское водохранилище, озеро Байкал.

A.L. Khomchanovsky
Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
Petropavlovsk-Kamchatcky
khomscience@mail.ru

SIMULATION OF COASTAL PROCESSES

Abstract. The article considers a number of approaches in the modeling coastal processes at the Novosibirsk reservoir and Baikal Lake. The profile of the relative dynamic equilibrium was calculated using the methodology from the code of rules SP 32-103-97 “Design of marine coastal protection structures”, the American SBEACH program and the Bruun-Dean formula. The reformation of the transverse profile of the coast by wind waves was simulated taking into account fluctuations in the level of water bodies in SBEACH and CROSS-P programs. When modeling the coastal sediment transport, the Leontief model and the LITPACK program were used. All the data obtained were compared with the data of geological and geomorphological studies, during which underwater and surface topographic profiles were measured, samples of sand material were selected and analyzed for particle size distribution, digital elevation models were built, and long-term meteorological observations were collected. Conclusions are drawn about the possible future prospects of mathematical modeling for the study of coastal processes. As a result of numerical experiments and analysis of the material obtained by expeditionary geological and geomorphological studies, it was concluded that the results of mathematical modeling showed good compatibility with other research methods, as well as with field data obtained as a result of the expeditions. A mathematical approach to the study of the development of coastal processes and coastal processing allows us to quantitatively study the dynamics of the relief of the coastal zone and makes it possible to approach the most important issue of forecasting coastal development. Due to this, it is possible to minimize the risks and negative consequences of exogenous geological processes. In addition to standard applied tasks (for example, the design and development of offshore shore protection structures) which use numerical modeling, this approach is also used to solve problems associated with fundamental scientific research – for example, erosion and accumulative process-

es and sediment movement during tsunamis are modeled, reconstruction equilibrium profiles after sharp rises or lowering of the relative ocean level due to coseismic vertical deformations on the coasts, located along subduction zones, etc.

Key words: shoreline retreat, numerical simulation, coastal processes, Novosibirsk reservoir, Lake Baikal.

В последнее время, наряду с традиционными методами береговых исследований, широко используется моделирование береговых процессов. Математический подход к изучению данного вопроса позволяет с количественной точки зрения изучить динамику рельефа береговой зоны. Основной задачей в ее изучении является определение пространственной структуры баланса наносов в зависимости от уже существующего рельефа и гидродинамического режима, регистрация поля глубин и анализ смены пластических деформаций рельефообразующей поверхности береговой морфосистемы во времени [2].

Математическое моделирование является одним из действенных инструментов для изучения морфодинамических процессов, протекающих в береговой зоне морей, крупных озер и водохранилищ и позволяет не только воспроизвести и объяснить наблюдаемые явления, но и подойти к решению практически важной задачи прогноза изменений дна и берегов. Разнообразие природных процессов определяет и различия в подходах к их моделированию. В данной статье нет задачи описать всевозможные подходы к моделированию или математическую суть тех или иных моделей. Автор лишь анализирует работу конкретных моделей и программ на конкретных объектах, основываясь на собственном опыте. По большей части здесь будут представлены несколько методов расчета профиля относительного динамического равновесия, моделирование переформирования поперечного профиля берега ветровым волнением с учетом колебания уровня, расчет результирующего вдольберегового потока наносов. А также кратко будут описаны несколько методов прогноза переработки берегов водохранилищ. Основными объектами исследования, как уже было сказано выше были внутренние водоемы – водохранилища и озера с регулируемым стоком.

Одним из ключевых понятий при моделировании береговых процессов является профиль относительного динамического равновесия. Если на подводном склоне каждая из частиц разной крупности и плотности передвинулась в такое положение, при котором она совершает возвратно-поступательное движение при отсутствии итогового перемещения, это означает, что частицы на профиле подводного склона пришли в состояние динамического равновесия с волнением. Такой профиль можно рассматривать как профиль динамического равновесия для данного установившегося волнения. Он представляет собой вогнутую вверх кривую, кривизна которой растет по направлению к берегу. Равновесным считается тот участок склона, на котором движение частицы в сторону берега, компенсируется обратным перемещением, так что итоговый транспорт наносов равен нулю [6].

Поскольку исследования, рассматриваемые в данной статье относятся в основном к аккумулятивным берегам, введем также определение аккумулятивный профиль равновесия – это поперечный профиль подводного берегового склона и пляжа, образующийся при достаточно длительном воздействии близких по характеру волнений (строго говоря, волн одних и тех же параметров) на дно, сложенное рыхлым материалом, и характеризующийся минимальными изменениями рельефа во времени [4]. Рассмотрим несколько примеров расчета профиля относительного динамического равновесия для песчаного пляжа Новосибирского водохранилища.

Моделирование профиля относительного динамического равновесия на Новосибирском водохранилище

Исследования проводились на искусственном пляже Новосибирского водохранилища, который был создан в 1962 г. С тех пор его параметры почти не изменились, что дает основание считать этот пляж стабильным, т.е. равновесным. Для расчета теоретического профиля равновесия были использованы 3 методики: методика, приведенная в своде правил «Проектирование морских берегозащитных сооружений» [5], американская программа SBEACH [14] и формула Брууна-Дина [11, 12, 13]. Исходные данные для расчета по формуле Брууна-Дина: набор пар горизонтальных и вертикальных координат,

медианная крупность материала, глубина замыкания (подробная методика указана в [12]). Второй расчетной методикой были рекомендации из Свода правил [5], где входными параметрами были: исходный профиль, медианная крупность материала, скорость и повторяемость ветра, высота и период расчетной волны.

Следующая методика основана на программе, разработанной в US Army Corps of Engineers – SBEACH. В данном случае нет возможности установить конечный профиль, поэтому было проделано несколько экспериментов с теми же параметрами волн и грансостава что и для расчета по другим методикам. В итоге было выбрано 2 профиля. Первый профиль был сформирован за 138 дней действия постоянного шторма, второй профиль – за 4,7 года. Эти профили примерно совпадают с профилями, рассчитанными по формуле Брууна-Дина и Своду правил соответственно (рис. 1, а). Из рисунка видно, что профиль по формуле Брууна-Дина наилучшим образом совпадает с измеренным современным профилем. Возможно, такой результат может означать, что методика, предложенная в Своде правил показывает конечный вариант профиля при постоянном экстремальном волнении. Примерно такой же профиль вырабатывается при постоянном почти пятилетнем волнении по методу SBEACH. Уклон профиля по формуле Брууна-Дина зависит в основном от размера материала, слагающего пляж и подводный береговой склон.

Моделирование перестроения поперечного профиля берега ветровым волнением на Новосибирском водохранилище и оз. Байкал с учетом колебания уровня

Для целей прогнозирования изменения профиля подводного берегового склона были выбраны программные продукты CROSS-P (разработан в ИВЭП СО РАН) и уже ранее упомянутый SBEACH. Обе программы были разработаны для моделирования переработки профиля берега, сложенного рыхлым несвязным материалом, ветровыми волнами, базируется на математических моделях, разработанных И.О. Леонтьевым [3, 7], Ларсоном и Краузом [14]. Входными параметрами для программ являются: исходный профиль дна, свойства наносов (плотность, пористость и средний размер частиц),

параметры волн на входе (высота, период, угол подхода к берегу), продолжительность действия волнения.

а)

б)

в)

Рис. 1. Моделирование береговых процессов на Новосибирском водохранилище [1]

Важной особенностью вышеописанных программ является то, что для моделирования можно задать любую штормовую ситуацию с разной продолжительностью. Следовательно, можно не только оценить, но и сравнить рельеф полученных профилей в любой момент времени. Имея такую, возможность интересно посмотреть, что случится с одним и тем же пляжем в результате действия на него одинаковых штормовых нагрузок, но при использовании разных программ CROSS-P и SBEACH. Моделирование проведено для того же пляжа, где рассчитывался профиль относительного динамического равновесия. Параметры волнения остались те же. Главное различие заключалось в продолжительности шторма, технических настройках программ (шаг по времени и по пространству) и эмпирических зависимостях самих моделей (рис. 1, б, в). Стоит упомянуть, что данные модели создавались в основном для морских побережий. Хотя принципиальной разницы в процессах развития берегов морей и водохранилищ нет [7], все же для использования той или иной модели необходима калибровка эмпирических параметров, что обеспечит нам наибольшую достоверность производимых расчетов и даст возможность наиболее точно прогнозировать эволюцию профиля. Сравнивая профили, рассчитанные в различных программах видно их визуальное отличие. Однако, общий уклон дна сохраняется. Разница заключается лишь в несоответствии местоположения элементов рельефа (таких как береговые валы), что может объясняться чрезвычайно большой заданной волновой нагрузкой, наличием всего одной штормовой ситуацией, настройкой программ и разными моделями, заложенными в их основе [8].

Ввиду вышесказанного было интересно провести численное моделирование переформирования профиля искусственного пляжа за один безледоставный период при учете реальной штормовой ситуации и в условиях колебания уровня. Расчеты проводились для того же пляжа, используя программу SBEACH, однако штормовая ситуация высчитывалась на основании срочных (каждые 3 часа) наблюдений Обской гидрометеорологической обсерватории (Обская ГМО).

Станция находится в непосредственной близости от района исследований. При моделировании годовой штормовой ситуации ис-

пользовались данные только за безледоставный период, по волноопасным румбам и при скорости ветра более 3,5 м/с. Поскольку уровень на водохранилище также не остается постоянным, данные по штормовому году из ранее составленной таблицы разбивались по группам с примерно одинаковым уровнем. Далее происходила группировка данных по направлению и скорости ветра. В итоге мы получили набор штормов с информацией о направлении, скорости и продолжительности действия ветра.

В дальнейшем эти данные использовались для расчета параметров волн. На рис. 2 представлены результаты моделирования деформации профиля при действии волновых нагрузок в течение одного года (рис. 2). Проанализировав весь цикл моделирования береговых процессов для пляжа Новосибирского водохранилища были сделаны следующие выводы: переформирование профиля происходит преимущественно при штормах юго-западного направления, изменение уровня водохранилища кардинально влияет на характер деформации профиля, основные изменения в береговом рельефе происходят в межсезонье (весной и осенью). Итак, назовем возможные причины таких результатов. Наибольшее влияние штормов юго-западного направления, вероятно, вызвано тем, что именно для этого румба характерна наибольшая длина разгона (более 40 км, где разгоны других румбов не превышают 10 км) и наибольшие глубины по разгону. По этим причинам на данном участке образуются волны с наибольшими параметрами, по сравнению с другими румбами, при одинаковой силе ветра. Следует отметить, что продолжительность действия ветров юго-западного направления составляет почти половину всех штормов. Что касается изменения уровня, как фактора берегоформирующих процессов, здесь можно сказать следующее: ввиду особенностей уровня режима Новосибирского водохранилища, его спуск и наполнение приходится как раз на межсезонье.

Принимая во внимание тот факт, что основные шторма происходят осенью, во время понижения уровня, то оба эти фактора для искусственного пляжа на Новосибирском водохранилище, накладываясь друг на друга, значительно влияют на процессы, из-

меняющие рельеф береговой зоны. Примером может служить ситуация в один из осенних штормов. Ранее образованный подводный вал (в результате довольно сильного шторма юго-западного направления) был перемещен на пляж, за счет понижения уровня, образовав прислоненную террасу, с характерным ярко-выраженным изгибом. Кстати, подобные формы рельефа были обнаружены и при повторном полевом исследовании этого участка. Необходимо также отметить, что результаты моделирования показали относительную стабильность пляжа, что также подтверждается его многолетним существованием [9].

Рис. 2. Численное моделирование изменения профиля пляжа северо-восточного побережья Новосибирского водохранилища в условиях сезонных колебаний уровня [9]

Следующие исследования проводились для песчаного островного бара Ярки, расположенного в северной части оз. Байкал. Для данной работы была использована ранее упомянутая программа CROSS-P. В качестве расчетного волнового воздействия был принят шторм, генерируемый южным ветром со скоростью 20 м/с. Повторяемость такого шторма составляет 1 раз в 25 лет [1].

Для моделирования были 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 [1]. Однако для «ужесточения» условий продолжительность была увеличена вдвое, т.е. до 12 ч. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Рис. 3. Результаты математического моделирования переформирования расчетного профиля штормовым волнением на оз. Байкал (снизу при повышении уровня) [10]

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. 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. Такие миграции материала являются отличительной чертой профиля динамического равновесия, они многократно наблюдались в натурных условиях и широко описаны в литературе [7]. В ходе работы была исследована также возможная реакция профиля бара на штормовое воздействие при общем повышении уровня водоема на 1 м (рис. 3). По данным моделирования оказалось, что даже в этом случае, надводная часть профиля не будет полностью размывта. Кроме того, достаточно ясно просматривается тенденция к смещению профиля назад и вверх в соответствие с правилом Брууна [11]. Полученный результат хорошо согласуется с фактическими данными [10]. Такая реакция островного бара на повышение уровня водоема является типичной и широко наблюдается и на океанских берегах [12].

Моделирование вдольберегового транспорта наносов

Исследования были проведены для уже знакомых нам объектов: искусственный пляж на Новосибирском водохранилище и островной бар Ярки в северной части оз.Байкал. Район исследования на Новосибирском пляже был разбит на 7 участков, имеющих разную длину и экспозицию. Для каждого участка были выявлены основные волноопасные румбы и в дальнейшем по ним были рассчитаны параметры волн [5], от которых в конечном итоге зависит полный расход вдольберегового потока наносов. В данном случае для расчета расхода вдольберегового потока наносов (Q , м³/с) использовалась модель И.О. Леонтьева [3]. Для определения продолжительности волновых нагрузок были использованы данные о средней повторяемости ветра по скорости и направлениям за безледоставный период для волноопасных румбов (15 апреля – 15 ноября) с метеостанции Обская за 1990-2010 гг.

На исследуемых участках было заложено 6 створов сети мониторинга, на которых были отобраны пробы грунта и проведена геодезическая съемка подводного берегового склона. Используя данные гранулометрического анализа и повторяемости ветра, по формуле И.О. Леонтьева [3] для каждого участка были рассчитаны годовые

ёмкости потока наносов ($\text{м}^3/\text{год}$) по направлениям и их результирующее значение. Результаты представлены в таблице.

**Годовые ёмкости вдольберегового потока наносов
на пляже Новосибирского водохранилища**

№ участка	Годовые значения расходов наносов, $\text{м}^3/\text{год}$		
	Q+ (слева-направо)	Q- (справо-налево)	Q Σ (результирующий)
1	3404	-460	2944
2	4402	-45	4357
3	5328	-715	4613
4	7763	-1042	6721
5	346	-6664	-6318
6	145	-5100	-4955
7	2182	-3969	-1787

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о существовании двух вдольбереговых потоков. Один поток наносов является положительным (слева-направо при взгляде с берега в акваторию) и направлен с юга на север, он проявляет себя с 1 по 4 участок. На 5 участке ситуация кардинально меняется и основные расходы материала приходятся в противоположенную сторону. На 6 и 7 участках транспорт наносов также отрицательный. Существование двух встречных потоков можно объяснить сменой экспозиции береговой линии и преобладанием ветров юго-западного направления. Результаты математического моделирования наглядно отражаются в рельефе. Аккумулятивные формы, примыкающие к крайним волноломам имеют размеры существенно бóльшие, по сравнению с другими. Также стоит отметить, что во время осенних штормов, на участке 7 шел активный размыв берега, в то время как на 6 участке образовывалась коса, что свидетельствует о существовании вдольберегового потока наносов с 7 на 6 участок. Данный факт также подтвердился результатами расчетов.

Для островного бара Ярки также было рассчитано направление и ёмкость вдольберегового перемещения наносов при помощи программного комплекса LITPASK, который является компонентом си-

системы гидравлического и гидрологического моделирования MIKE (разработчик – Danish Hydraulic Institute) [15]. Результаты расчетов представлены в таблице 2 (нумерация участков слева на право/с запада на восток). Математическое моделирование вдольберегового перемещения наносов хорошо соотносится с натурными данными, полученными в результате экспедиции. В настоящее время значительная, а, возможно, и большая часть песка, подаваемая волнами от устья Верхней Ангары, уходит в просвет между вторым и третьим островами протяженностью 2.3 км и наращивает ширину мелководья со стороны Ангарского Сора. Аналогичная картина имеет место и за промоиной у восточного конца первого острова. Поэтому и происходит интенсивный размыв восточных концов островов (рис. 4).

Рис. 4. Вдольбереговое перемещение наносов в районе островного бара Ярки (оз. Байкал)

Перспективы математического моделирования для исследования береговых процессов

Математическое моделирование на данном этапе береговых исследований является одним из важнейших методов изучения гидро-, морфо- и литодинамических процессов. Этот подход, наряду с ГИС технологиями отлично дополняет традиционные географические и

геолого-геоморфологические методы, способствует получению необходимых количественных данных и, что особенно важно, дает возможность подойти к важнейшему вопросу прогноза развития берегов, что позволяет минимизировать риски и негативные последствия экзогенных геологических процессов. На данный момент создано немало различных моделей для расчета вдольберегового потока наносов, штормовых деформаций и сезонных изменений профиля, а также прогноза долговременного развития берега. Однако, следует помнить об особой сложности процессов, происходящих в береговой зоне. Учесть все аспекты и факторы, влияющие на природные процессы чрезвычайно сложно. Поэтому во многих моделях присутствуют эмпирические зависимости, основанные на опыте исследований разных объектов и статистические данные. Математическое моделирование широко используется в прикладных исследованиях, например при проведении инженерных расчетов для береговой защиты. Кроме того, математическое моделирование находит применение и при решении задач связанных с фундаментальными научными исследованиями – например, моделируются эрозионные и аккумулятивные процессы и перемещение осадков во время цунами, перестройка профилей равновесия после резких поднятий или опусканий относительного уровня океана в связи с косейсмическими вертикальными деформациями на побережьях расположенных вдоль зон субдукций и т.д.

Подготовка публикации выполнена в рамках государственной темы № 0282-2018-0019 (ИВиС ДВО РАН).

Литература

1. Атлас волнения и ветра озера Байкал. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 117 с.
2. Игнатов Е.И. Береговые морфосистемы. Москва-Смоленск: Маджента, 2004. 352 с.
3. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.

4. Морская геоморфология: терминологический справочник. Береговая зона: процессы, понятия, определения / ред. В.П. Зенкович, Б.А. Попов. М.: Мысль, 1980. 280 с.
5. Проектирование морских берегозащитных сооружений: СП 32-103-97. М.: Трансстрой, 1998. 221 с.
6. Сафьянов Г.А. Геоморфология морских берегов. М., 1996. 400 с.
7. Хабидов А.Ш., Леонтьев И.О. и др. Управление состоянием берегов водохранилищ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 239 с.
8. Хомчановский А.Л., Фёдорова Е.А., Лыгин А.А., Хабидов А.Ш. Сравнительный анализ методов расчета профиля динамического равновесия // Геоморфология. 2014. № 3. С. 39-42.
9. Хомчановский А.Л. Численное моделирование изменения профиля пляжа северо-восточного побережья Новосибирского водохранилища в условиях сезонных колебаний уровня // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: тр. Междунар. науч.-практ. Конф (28–30 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.
10. Хомчановский А.Л. Развитие береговых процессов при повышении уровня водоема (на примере озера Байкал) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 1. Вып. 41. С.99-107.
11. 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.
12. Dean R.G., Dalrymple R.A. Coastal Processes with Engineering Applications. University of Florida, Gainesville, Fl, 1993. 416 p.
13. Dean R.G. Beach nourishment. Theory and practice. New Jersey: World Scientific, 2002. 398 p.
14. Larson M. and Kraus N.C. "SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 1: Empirical foundation and model development". 1989. Technical Report CERC-89-9, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.

15. Littoral processes and coastline kinetics // ЛИТРАСК. Режим доступа: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/litpack>.

Reference

1. *Atlas volneniya i vetra ozera Baykal* [Wave and wind atlas of Baikal lake]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977. 117 p. (in Russian)
2. Ignatov E.I. *Beregovye morfosistemy* [Coastal morphosystems]. Moscow-Smolensk, Madzhenta, 2004. 352 p. (in Russian)
3. Leont'ev I.O. *Pribrezhnaya dinamika: volny, techeniya, potoki nanosov* [Coastal dynamics: waves, currents, sediment transport]. Moscow, GEOS, 2001. 272 p. (in Russian)
4. *Morskaya geomorfologiya: terminologicheskij spravochnik. Beregovaya zona: processy, ponyatiya, opredeleniya* [Sea geomorphology: terminological handbook. Coastal zone: processes, concepts, definitions]/ red. V.P. Zenkovich, B.A. Popov. Moscow, Mysl', 1980. 280 p. (in Russian)
5. *Proektirovanie morskikh beregozaschitnykh sooruzheniy. SP 32-103-97* [Engineering of the marine shore protective buildings. Code of practice 32-103-97]. Moscow, Transstroy Corporation, 1998, pp. 14-20. (in Russian)
6. Saf'yanov G.A. *Geomorfologiya morskikh beregov* [Coastal geomorphology]. Moscow, MSU publ., 1996. 400 p. (in Russian)
7. Khabidov A.Sh., Leont'ev I.O. [et.]. *Upravlenie sostoyaniem beregov vodohranilishch* [Management of man-made lake coasts]. Novosibirsk, SB RAS, 2009. 239 p. (in Russian)
8. Khomchanovsky A.L., Fedorova E.A., Lygin A.A., Khabidov A.S. *Sravnitel'nyj analiz metodov rascheta profily adinamicheskogo ravnovesiya* [Comparative analysis of equilibrium beach profile calculation methods]. *Geomorfologiya* [Geomorphology], 2014, № 3, pp. 39-42. (in Russian)
9. Khomchanovsky A.L. *Chislennoe modelirovanie izmeneniya profilya plyazha severo-vostochnogo poberezh'ya Novosibirskogo vodohranilishcha v usloviyah sezonnykh kolebanij urovnya* [Numerical simulation of beach profile changes of north-eastern coast of Novosibirsk reservoir in conditions of seasonal fluctuations in the level // *Sovremennye problem vodohranilishch i ih vodosborov: tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. Konf* (28 maya – 30 maya 2013 g., Perm') [Russian scientific and practical conference with international par-

ticipation “Modern problems of reservoirs and their catchment areas”] / Perm State University. Perm, 2013, pp. 308-311. (in Russian)

10. Khomchanovsky A.L. *Razvitie beregovykh processov pri povyshe-nii urovnya vodoema (na primere ozera Bajkal)* [Development of coastal processes with the increase of water level: a case study for Lake Baikal]. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAUNZ. Earth sciences], 2019, № 1, no. 41, pp. 99-107. (in Russian)

11. 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, no. 4, № 4, pp. 627-648.

12. Dean R.G., Dalrymple R.A. *Coastal Processes with Engineering Applications*. University of Florida, Gainesville, Fl, 1993. 416 p.

13. Dean R.G. *Beach nourishment. Theory and practice*. New Jersey: World Scientific, 2002. 398 p.

14. Larson M. and Kraus N.C. *"SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 1: Empirical foundation and model development"*. 1989. Technical Report CERC-89-9, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.

15. *Littoral processes and coastline kinetics* [electronic resource] // LITPACK. URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/litpack>.