

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ШЕЛЬФЕ
И НА ПОБЕРЕЖЬЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

УДК 551.345

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ТЕРМОАБРАЗИИ МОРСКИХ БЕРЕГОВ
РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ НА БЛИЖАЙШИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

А.А. Васильев, В.Е. Остроумов*, С.В. Губин*, В.А. Сороковиков*

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, z_v_a_a@dio.ru
* Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290, Пушкино, Московская обл., Россия

Представлены результаты стохастического моделирования и прогноза термоабразии морских берегов на примере ключевых участков Марре-Сале (Карское море) и мыса Малый Чукочий (Восточно-Сибирское море). Установлено, что временные изменения скорости разрушения обладают марковским свойством. Сделан вывод о незначительном повышении скорости термоабразии в ближайшие десятилетия.

Марковское свойство, моделирование, отступление берегов, термоабразия

MODELLING AND PREDICTION OF COASTAL DYNAMICS
IN RUSSIAN ARCTIC FOR NEXT DECADES

A.A. Vasiliev, V.E. Ostroumov*, S.V. Gubin*, V.A. Sorokovikov*

Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, z_v_a_a@dio.ru
* Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soils Science RAS,
142290, Pushchino, Moscow region, Russia

The paper presents the results of stochastic modelling and prediction of coastal dynamics on example of Marre-Sale (Kara Sea) and Cape Maly Chuochy (East Siberian Sea) key sites. It has been found that temporal changes of coastal retreat rate possess Markov characteristic. The conclusion has been drawn about minor increase in coastal retreat rate for next decades.

Markov chain, modelling, coastal retreat rate, thermal erosion

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы заключается в проверке возможности применения стохастических методов для моделирования и прогноза термоабразии и оценке на этой основе тенденций разрушения морских берегов Российской Арктики в ближайшие десятилетия.

Наиболее типичные скорости отступления морских берегов в Российской Арктике оцениваются первыми метрами в год, в отдельных случаях – десятками метров в год [Арэ, 1980]. Установлено, что для скорости термоабразии характерна не только высокая пространственная изменчивость, но и выраженные изменения во времени [Шур и др., 1984; Васильев и др., 2001; Solomon, 2003]. Временная изменчивость определяется природными факторами, которые применительно к западному сектору Российской Арктики описаны ранее [Васильев, 2005].

Прогнозные модели, описывающие динамику термоабразии, можно условно разделить на три группы.

К первой группе относятся модели, основанные на физико-географических аналогиях [Нееф, 1974]. В этом случае для нахождения прогнозируемых характеристик подбирается территория-аналог с известными характеристиками и делаются предположения об их дальнейших изменениях во времени. Несмотря на недостаточную формализацию процедур, метод физико-географических аналогий при некотором опыте исследователя позволяет получить сравнительно хорошие оценки. Применительно к прогнозу криогенных физико-геологических процессов теоретические основы метода рассмотрены С.Е. Гречищевым с соавт. [1980].

Ко второй группе относятся прогнозные модели, базирующиеся на описании физических за-

кономерностей термоабразии. Можно разделить модели этой группы на две подгруппы: а) модели, в которых использованы строгие гидродинамические построения; б) модели, основанные на эмпирических зависимостях параметров термоабразии от природных факторов. Модели первой подгруппы описывают изменения вещественных и энергетических потоков, таких как транспорт наносов [Климович, Прокофьев, 2002], энергия волн [Зенкович, 1946], теплообмен в системе мерзлая порода – морская вода [Малиновский, 1982; Балобаев, 1984] и других элементов термоабразионного процесса. Сложность взаимодействия перечисленных факторов затрудняет разработку адекватных моделей [Арэ, 1985]. Тем не менее такой подход успешно развивается и реализован, например, для прогноза динамики берегов Байдарацкой губы Карского моря [Природные..., 1997; Леонтьев, 2002]. Модели второй подгруппы основаны на эмпирических зависимостях параметров термоабразии от природных и техногенных факторов [Арэ, 1985; Разумов, 1996, 2001; Narin et al., 1998]. Такие модели дают возможность описать процесс термоабразии в целом, но, как правило, не позволяют достаточно полно отразить динамику процесса, а их практическое применение осложнено необходимостью трудоемкого определения многочисленных эмпирических коэффициентов.

К третьей группе прогнозных моделей относятся стохастические модели. Подобно другим сложным природным процессам динамика термоабразии имеет отчасти случайный характер. Разработка стохастических, а также комплексных подходов может расширить возможности моделирования динамики термоабразии.

В настоящей работе сделана попытка воспроизвести динамику термоабразии, используя марковскую модель. Это стало возможным благодаря тому, что последовательность скорости отступления береговой линии подчиняется марковской статистике.

ОБЪЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДАННЫЕ МОНИТОРИНГА

Исследовались ключевые участки Марре-Сале (Западный Ямал, Карское море) и мыс Малый Чукочий (побережье Колымской низменности, Восточно-Сибирское море). На участке Марре-Сале наблюдениями охвачено 4,5 км береговой линии. Многолетнемерзлые породы, подвергающиеся термоабразии, представлены здесь в основном прибрежно-морскими и морскими осадками суглинистого и глинистого состава, перекрытыми песками. Лыдность многолетнемерзлых пород составляет 0,2–0,4 [Каневский и др., 2005]. Абсолютные отметки поверхности – от 10 до 29 м. Изобата 10 м находится в 3,5 км от берега.

Наблюдения за динамикой термоабразии проводятся начиная с 1978 г. на 55 ортогональных к берегу профилям. В зависимости от локальных условий средние скорости отступления бровки берегового клифа по данным 27-летних наблюдений составляют 1,3–1,8 м/год, при экстремальных значениях 0 и 3,5 м/год [Vasiliev et al., 2005]. В ряду наблюдений длиной в 27 лет имеется четыре пропущенных года. Непрерывность исходной последовательности – важное условие для стохастических моделей. Поэтому имеющиеся пропуски были заполнены данными, полученными линейной интерполяцией. Заполнение пропущенных позиций во временной последовательности допустимо при использовании данных для тестирования модели.

Ключевой участок мыс Мал. Чукочий находится на западе Колымской низменности. Он занимает 3 км береговой полосы к юго-востоку от устья р. Чукочь. Береговые уступы высотой более 30 м сложены ледовым комплексом (едомная свита верхнего плейстоцена). Абсолютные отметки поверхности местами превышают 41 м. Подошва ледового комплекса залегает ниже уровня моря [Гиличинский, 2002]. Многолетнемерзлая толща формировалась как континентальный сингенетический осадок озерно-болотного и аллювиального генезиса. Осадочный материал представлен пылеватыми суглинками с линзами торфа, мало уплотнен, имеет высокую лыдность за счет текстурного льда и льда-цемента, содержит мощные повторно-жильные льды. Наряду с отложениями ледового комплекса распространены аласные отложения, которые отличаются от ледового комплекса более высокой плотностью, относительно небольшим содержанием конституционного льда и фрагментарным присутствием маломощных эпигенетических повторно-жильных льдов. Подробная характеристика осадочных образований на мысе Мал. Чукочий содержится в работах А.А. Архангелова [1977], С.О. Разумова [1996], А.В. Шера [1997], Д.А. Гиличинского [2002] и др.

Важной особенностью рассматриваемого ключевого участка является обширное прибрежное мелководье. Изобата 10 м находится здесь в 24–35 км от берега [Советская..., 1970]. Малые уклоны дна существенно ослабляют волновое воздействие на береговую зону и затрудняют вынос продуктов ее разрушения с подводного берегового склона.

Наблюдения на береговых профилях ключевого участка мыс Мал. Чукочий были начаты в 1974 г. [Холодов и др., 2003]. В настоящее время они выполняются на пяти профилях. Имеющиеся ряды скорости отступления береговой линии на этих профилях содержат от трех до семи пропусков, которые с целью тестирования модели были заполнены с помощью линейной интерполяции. На профиле 1 наблюдались средние скорости более 3,5 м/год (рис. 1,б). Здесь в пределах аквато-

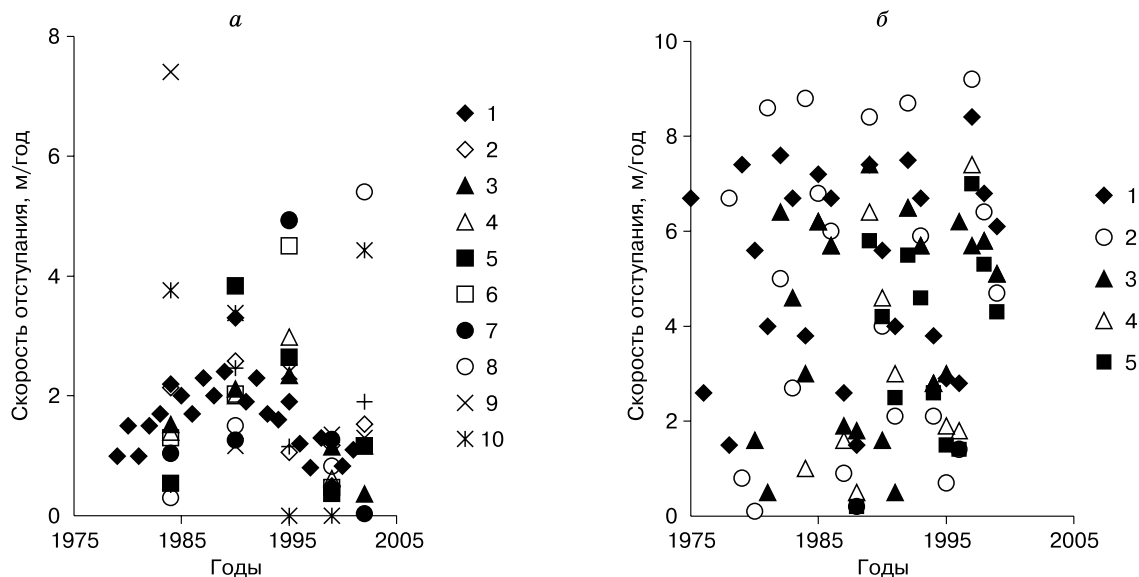


Рис. 1. Измеренные скорости отступления бровки берегового клифа по данным мониторинга на профилях ключевых участков Марре-Сале (а) и мыс Мал. Чукочий (б):

1–10 (а) и 1–5 (б) – номера профилей соответствующих участков.

рии эстуария р. Бол. Чукочья у берега проходит продолжение руслового потока, который обеспечивает вынос осадка с подводного берегового склона. Максимальная измеренная скорость отступления береговой бровки на профиле 1 достигала 5,5 м/год [Холодов и др., 2003]. На других профилях данного участка берега не подвергаются воздействию руслового потока. Второй и третий профили проходят по аласной котловине с высотными отметками 17–22 м. Береговой уступ здесь отвесный. Четвертый и пятый профили заложены на склоне крупного останца отложений ледового комплекса. На этом склоне наблюдаются проявления линейной термоэрозии. Формирования термотеррас на ключевом участке не наблюдается. Средняя за весь период наблюдений скорость отступления бровки берега на ключевом участке мыс Мал. Чукочий составила 4,3 м/год.

На обоих ключевых участках выполняются наблюдения за отступанием бровки берегового обрыва. В принципе, скорость отступления бровки может отличаться от скорости отступления берега. Однако в многолетнем аспекте эти скорости практически одинаковы. Для контроля в 2000 и 2002 гг. в Марре-Сале были выполнены измерения положения как бровки берегового обрыва, так и его подножия с помощью лазерного теодолита. Измерения показали, что средние скорости отступления в этих случаях совпадают.

В качестве примера данных, используемых для тестирования модели, на рис. 1 показаны результаты определения скорости отступления бере-

говой линии для 10 из 55 имеющихся профилей ключевого участка Марре-Сале и для пяти профилей ключевого участка мыс Мал. Чукочий.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проверка наличия марковского свойства.

Для стохастического моделирования на основе марковских цепей необходимо было проверить временные последовательности скорости отступления береговой линии на наличие марковского свойства. Марковский процесс – это такая последовательность дискретных состояний объекта, в которой каждое последующее состояние не зависит от предыдущих. Однако каждое предыдущее состояние (или несколько предыдущих состояний) системы в марковском процессе определяет вероятность ее перехода в определенное последующее состояние [Корн, Корн, 1977]. Таким образом, марковская последовательность обладает вероятностной памятью [Harbaugh, Bonham-Carter, 1970]. Стандартный тест на марковость основан на проверке гипотезы о существовании вероятностной памяти в дискретных временных последовательностях. Процедура теста описана в работе Т.В. Андерсона и Л.А. Гудмана [Anderson, Goodman, 1957]. Временные последовательности скорости отступления береговой линии для ключевых участков Марре-Сале и мыс Мал. Чукочий были проверены с помощью этой процедуры. Значения критерия h_2 , подтверждающего гипотезу о марковости, изменяются для профилей Марре-Сале и мыса

Мал. Чукокий в пределах 112–384 и 247–381 соответственно. Критическое значение этого критерия, выше которого гипотеза достоверна при стандартных условиях (с вероятностью больше 0,95 при четырех степенях свободы), составляет 9,49 [Harbaugh, Bonham-Carter, 1970]. Таким образом, рассмотренные последовательности скоростей отступления береговой линии обладают марковским свойством.

Структура модели и алгоритм программы.

Марковское свойство временных последовательностей скорости отступления береговой линии позволяет моделировать эти последовательности в рамках стохастического подхода. Математический аппарат для марковских моделей детально разработан и многократно опробован при моделировании стратиграфических последовательностей [Vistelius, 1967], реконструкции динамики теплового потока по стратиграфическим последовательностям [Ferrero, Gallagher, 2002], кристаллизации льда в неоднородной среде, моделировании неоднородности грунтовых массивов [Elfeki, Dekking, 2001] и других геологических и гидрологических процессов. В нашем случае для моделирования временных последовательностей скорости отступления береговой линии использовалась марковская цепь первого порядка. Переходные вероятности вычислялись по измеренным последовательностям скорости отступления береговой линии, представленным в дискретной форме.

Используемый нами алгоритм заимствован из работ [Vistelius, 1967] и [Harbaugh, Bonham-Carter, 1970] с добавлением блоков дискретизации непрерывной временной последовательности. Алгоритм включает следующие шаги: 1) дискретизация наблюдаемой временной последовательности скоростей отступления береговой линии; 2) тестирование полученной дискретной последовательности на марковское свойство; 3) расчет матриц переходных вероятностей в естественной и кумулятивной форме; 4) вычисление моделируемой дискретной последовательности с использованием полученных матриц переходных вероятностей; 5) вычисление моделируемой последовательности скоростей отступления береговой линии; 6) сравнение статистических показателей для прототипа (измеренные скорости) и прогнозируемых временных последовательностей скорости отступления береговой линии (средние значения, мода, среднее квадратическое отклонение).

Состав и свойства пород, а также внешние факторы термоабразии рассматривались как постоянные вдоль каждого берегового профиля (модель со стационарными матрицами переходных вероятностей). Альтернативный подход [Ostroumov, 2003] предполагает мгновенную смену условий термоабразии и вида матриц переходных вероятностей при пересечении береговой линией литоло-

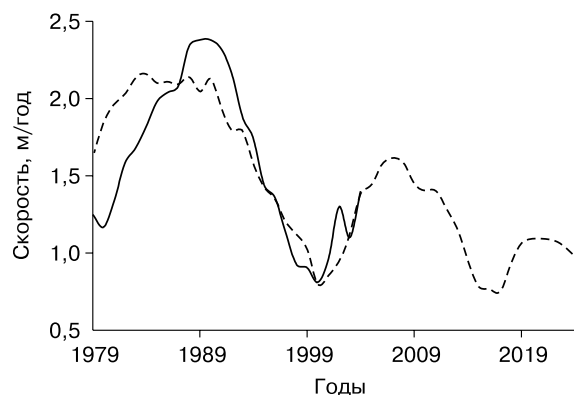


Рис. 2. Наблюдаемая (сплошная линия) и моделируемая (штриховая линия) последовательности скорости отступления бровки берегового клифа (профиль 1, Марре-Сале).

гических и геоморфологических границ либо при смене гидрологических факторов (модель с кусочно-стационарными матрицами переходных вероятностей). Однако в наших расчетах этот подход не применялся.

Модель реализована в виде программных модулей для работы в среде MS Excel, написанных на языке VBA.

Тестирование модели. Данные берегового мониторинга использованы для тестирования модели. На рис. 2 сплошная кривая построена по данным мониторинга, штриховая кривая представляет собой моделируемую последовательность скоростей отступления береговой линии. Видно, что кривая реальных наблюдений и расчетные данные согласуются между собой.

Сходство формы наблюдаемой и моделируемой динамических кривых показывает, что модель позволяет воспроизвести основные особенности изменения скорости отступления береговой линии во времени. В частности, модельная кривая отражает квазицикличность скорости отступления, причем продолжительность периода колебаний по модельной кривой и по прототипу близки между собой.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование было выполнено в двух вариантах. В первом варианте моделировалось непосредственно отступление береговой линии на основе данных многолетнего мониторинга. Во втором варианте моделировались прогнозные значения комплексной характеристики синоптических условий в циркумполярной области — индексов североатлантической осцилляции (CAO), арктической осцилляции (AO) и на основе выявленной связи индекса CAO (AO) и скорости отступления берега [Atkinson, Solomon, 2003] прогнозные величины

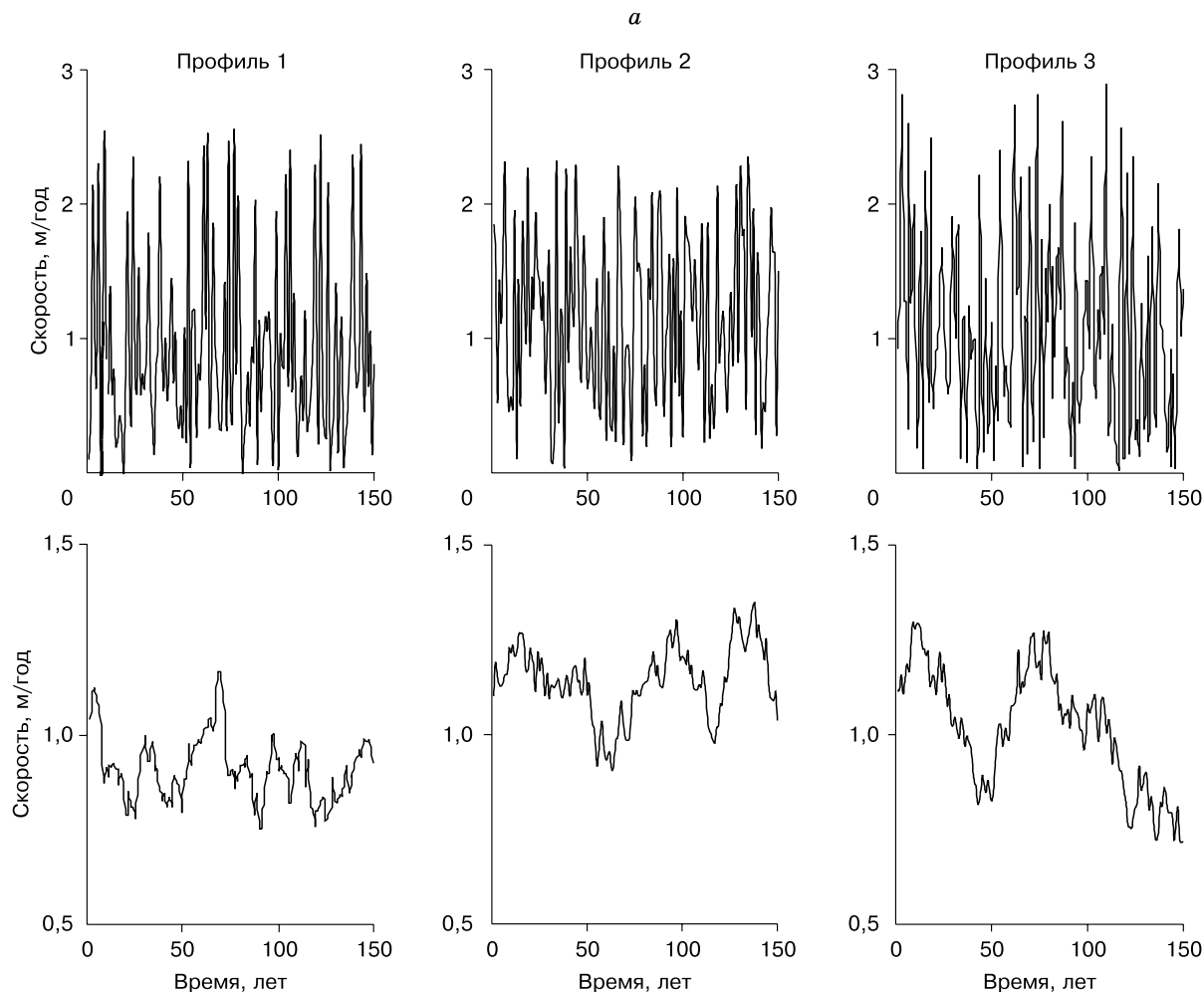


Рис. 3. Моделируемые временные последовательности скорости отступления бровки берегового клифа на ключевых участках Марре-Сале (а) и мыс Мал. Чукочий (б).

Вверху – без сглаживания; внизу – те же данные после сглаживания по 21 точке.

индекса САО (АО) пересчитывались в значения скорости отступления.

Вариант 1. Для всех береговых профилей обоих ключевых участков рассчитаны кривые изменения скорости отступления берега во времени. Примеры этих кривых показаны на рис. 3. Диапазоны изменения скорости отступления береговой линии в модельных данных и для прототипа совпадают. Большое число расчетных точек не позволяет визуально отразить особенности динамики, поэтому данные для наглядности сглажены по 21 точке.

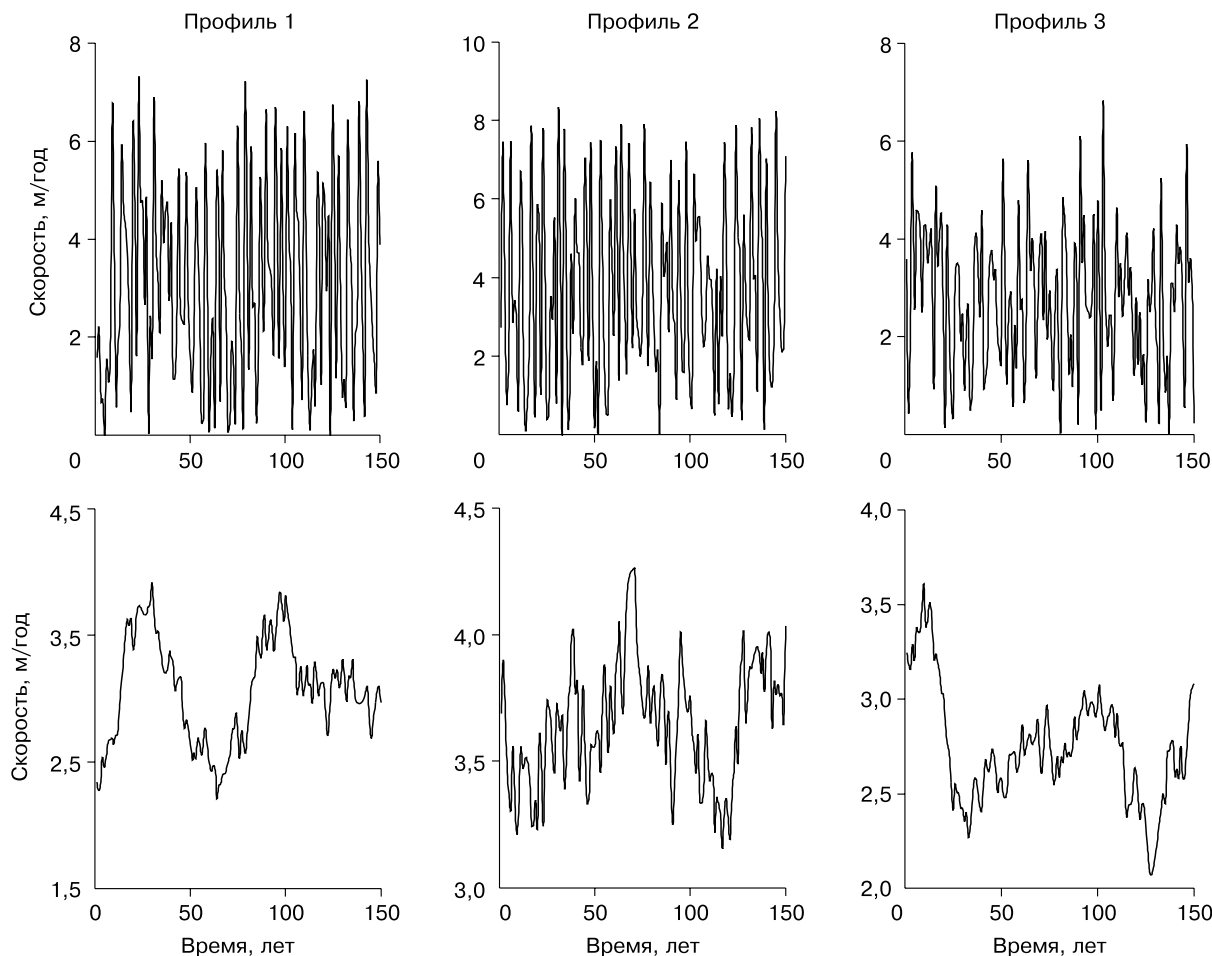
Полученные в результате сглаживания кривые отражают квазицикличность изменений скорости отступления береговой линии во времени. Одно из возможных объяснений различий в цикличности на разных профилях связано с особенно-

стями факторов, определяющих процесс термоабразии. Цикличность с периодом около 100 лет проявляется на типичных термоабразионных берегах участка Марре-Сале.

Как видно на рис. 2, модель в целом правильно описывает реальную динамику термоабразии, а расчетные значения скорости на временном отрезке с 1988 по 2004 г. близки к реально наблюдаемым. При современной средней скорости отступления берега 1,7 м/год в расчетах получено около 1,3 м/год. Таким образом, прогноз на основе непосредственного использования данных мониторинговых наблюдений дает несколько заниженные результаты. Вероятно, такие оценки можно считать минимальными.

Вариант 2. Ряды наблюдений за параметрами барико-циркуляционного режима для Североатлан-

б



Окончание рис. 3.

тической области, в том числе индекса САО (АО), значительно длиннее, чем ряды наблюдений за темпами разрушения берегов, поэтому можно ожидать, что применение стохастического метода прогнозирования для прогноза изменения индекса САО во времени может дать более точные результаты.

Процедура прогноза индекса САО аналогична выполненной ранее для рядов наблюдений за разрушением берегов. Далее на основе прогнозных значений индекса САО и выявленной корреляционной зависимости скорости отступления берегов от индекса САО можно рассчитать прогнозную величину отступления берегов.

Результаты моделирования для участка Марре-Сале представлены на рис. 4. Как видно из графика, второй вариант прогноза дает более высокие рассчитанные значения средней скорости разрушения берегов – 1,9–2,2 м/год. Эта величина больше реально наблюдаемой скорости 1,7 м/год в 1978–2004 гг.

Проведенный ранее анализ связи динамики морских берегов с определяющими факторами [Васильев, 2005] позволяет также сделать приближенные прогнозные оценки изменения скорости отступления берегов при повышении уровня Мирового океана и при некоторых видах техногенных воздействий. По оценкам Всемирной метеорологической организации, возможное максимальное повышение уровня в течение ближайших 50 лет может составить 0,5 м [Павлидис и др., 1998]. Если принять повышение уровня во времени равномерным, то скорость его составит 1 см/год. В оценке изменения скорости разрушения морских берегов это может быть смоделировано как увеличение средней высоты волн на такую же величину. Выполняется условие

$$E \approx (1,05-1,15)h^2/t,$$

где E – энергия волн; h – высота волн, м; t – период волн, с.

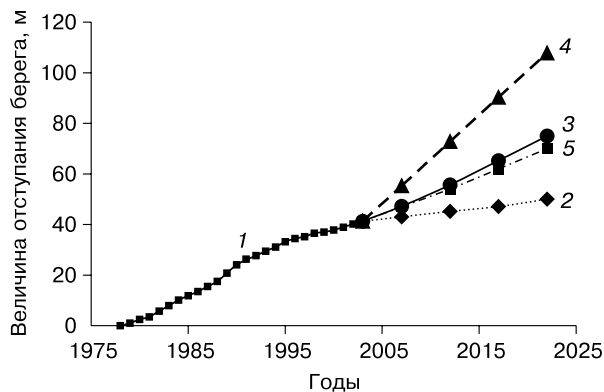


Рис. 4. Интегральные фактические и прогнозные величины отступления берега на ключевом участке Марре-Сале:

1 – фактическое отступление (1978–2004 гг.); 2–5 – прогноз (2 – минимальное отступление, 3 – при повышении уровня Мирового океана на 1 см/год, 4 – максимальное (катастрофическое) отступление, 5 – отступление по наиболее вероятному сценарию).

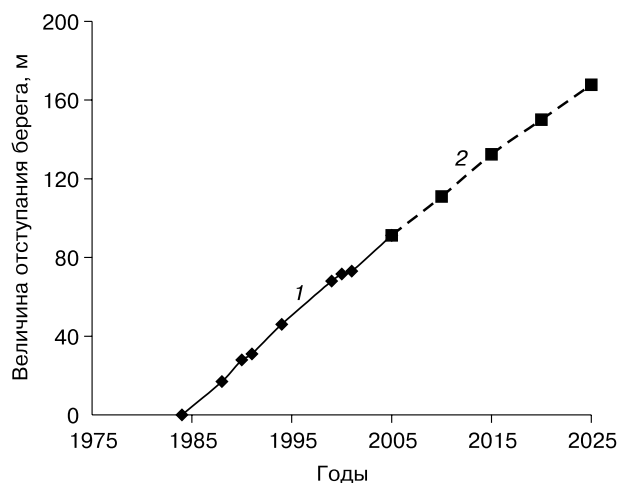


Рис. 5. Интегральные фактические и прогнозные величины отступления берега на ключевом участке мыс Мал. Чукокий:

1 – фактическое отступление (1984–2005 гг.); 2 – прогноз.

Коэффициент пропорциональности 1,05–1,15 отражает типичную ситуацию, когда высота волн в 95–85 % случаев составляет 0,5 м. Получаем, что суммарная энергия волн увеличится примерно на 4 %. Такому увеличению энергии волн соответствует возрастание скорости до 1,8–1,9 м/год. Таким образом, при сценарии равномерного повышения уровня Мирового океана со скоростью 1 см/год в начальный период скорость разрушения берегов возрастает с 1,6–1,7 до 1,8–1,9 м/год.

По нашему мнению, оценки повышения уровня Мирового океана со скоростью 1 см/год являются чрезмерными. Эта величина более соответствует катастрофическому повышению уровня, поскольку почти на порядок больше современной скорости опускания территории за счет неотектонических движений [Никонов, 1977].

Аналогично может быть рассчитано изменение скорости отступления берега при отборе песчаного материала с пляжа и прибрежной части подводного берегового склона. Расчеты показывают, что углубление подводного склона на 0,5 м вблизи береговой линии приведет к возрастанию скорости отступления берега примерно в 4–5 раз. Это вполне согласуется с результатами фактических наблюдений в районе мыса Харасавэй [Камалов и др., 2002]. Здесь при добыче песка с пляжа скорость термоабразии возросла с 1,4 до 5,0 м/год.

В качестве максимальной (катастрофической) скорости отступления берега на рис. 4 принята скорость, превышающая 3,5 м/год, которая соответствует максимальной из реально наблюдаемых скоростей за период 1978–2005 гг.

Анализ полученных результатов показывает, что с 2006 по 2025 г. на участке Марре-Сале сред-

ние скорости отступления берегов не превысят 2,0 м/год, а наиболее вероятные рассчитанные скорости составят 1,6–1,9 м/год. На участке мыс Мал. Чукокий средняя за 21 год скорость отступления берега была 4,3 м/год, а прогнозная составит около 3,8 м/год (рис. 5).

Таким образом, из выполненных прогнозных оценок следует, что в условиях естественной эволюции берегов в последующие 20 лет скорости отступления берегов будут близки к современным или даже несколько ниже их.

Как было установлено ранее, изменения в темпах термоабразии во времени происходят синхронно, по крайней мере, в западном секторе Российской Арктики [Васильев, 2005]. Поэтому выявленные тенденции будут характерны для всего побережья Баренцева и Карского морей. Модельные расчеты показывают, что и в восточном секторе Российской Арктики в предстоящие 20 лет также не будет наблюдаться существенного увеличения скорости отступления берегов. Причиной этого является то, что, несмотря на современное потепление климата в высоких широтах и увеличение продолжительности безледного периода, заметного повышения волновой активности в арктических морях не наблюдается [Васильев, 2005].

ВЫВОДЫ

На примере двух ключевых участков берегов Российской Арктики показано, что временные последовательности скорости отступления береговой линии обладают марковским свойством. Это позволяет использовать марковский аппарат для стохастического моделирования динамики береговой линии при термоабразии. Модель термоабра-

зии, основанная на марковских цепях, удовлетворительно описывает динамику отступления береговой линии и может применяться для прогнозного моделирования.

Стохастическое моделирование не рассматривается как самостоятельный и достаточный инструмент, но может быть использовано как дополнительный метод в комплексе с детерминистскими моделями.

Выполненные прогнозные оценки показывают, что в последующие 20–25 лет скорость термоабразии морских берегов Российской Арктики существенно не изменится по сравнению с современной.

Литература

- Архангелов А.А.** Подземное оледенение севера Колымской низменности в позднем кайнозое // Пробл. криолитологии. Вып. VI. М., Изд-во Моск. ун-та, 1977, с. 26–57.
- Арэ Ф.Э.** Термоабразия морских берегов. М., Наука, 1980, 159 с.
- Арэ Ф.Э.** Основы прогноза термоабразии берегов. Новосибирск, Наука. Сиб. отд-ние, 1985, 172 с.
- Балобаев В.Т.** Расчет протаивания сильнольדיстых горных пород под дном водоемов с учетом осадки при оттаивании // Береговые процессы в криолитозоне. Новосибирск, Наука. Сиб. отд-ние, 1984, с. 93–100.
- Васильев А.А.** Влияние факторов природной среды на динамику морских берегов западного сектора Российской Арктики // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 3, с. 64–72.
- Васильев А.А., Покровский С.И., Шур Ю.Л.** Динамика термоабразионных берегов Западного Ямала // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 1, с. 44–52.
- Гиличинский Д.А.** Криобиосфера позднего кайнозоя: вечная мерзлота как среда сохранения жизнеспособных микроорганизмов: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Тюмень, 2002, 59 с.
- Гречищев С.Е., Чистотин Л.В., Шур Ю.Л.** Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М., Недра, 1980, 383 с.
- Зенкович В. П.** Динамика и морфология морских берегов. Ч. 1. Волновые процессы. М., Изд-во АН СССР, 1946, 271 с.
- Камалов А.М., Огородов С.А., Архипов В.В.** Динамика берегов Западного Ямала // Материалы Междунар. конф. "Экстремальные криосферные явления: фундаментальные и прикладные аспекты". Пушино, 2002, с. 63–64.
- Каневский М.З., Стрелецкая И.Д., Васильев А.А.** Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений Западного Ямала (на примере района Марре-Сале) // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 3, с. 16–27.
- Климович В.И., Прокофьев В.А.** Численное исследование зависимости морских водозаборных сооружений на основе решения плановой задачи гидродинамики открытого потока и транспорта наносов // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2002, т. 240, с. 134–145.
- Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике. М., Наука, 1977, 832 с.
- Леонтьев И.О.** Моделирование эволюции аккумулятивных берегов Баренцева и Карского морей // Геоморфология, 2002, № 1, с. 53–65.
- Малиновский Д.В.** Математическое моделирование термоэрозионного процесса // Термоэрозия дисперсных пород. М., Изд-во Моск. ун-та, 1982, с. 135–145.
- Нееф Э.** Теоретические основы ландшафтоведения. М., Прогресс, 1974, 219 с.
- Никонов А.А.** Голоценовые и современные движения земной коры. М., Наука, 1977, 240 с.
- Павлидис Ю.А., Ионин А.С., Щербаков Ф.А. и др.** Арктический шельф. Позднечетвертичная история как основа прогноза развития. М., ГЕОС, 1998, 187 с.
- Природные условия Байдарацкой губы.** Основные результаты исследований для строительства подводного перехода / Под ред. Г.И. Дубикова. М., ГЕОС, 1997, 432 с.
- Разумов С.О.** Динамика морских термоабразионных берегов в связи с особенностями мерзлотно-климатических условий (на примере Колымского залива Восточно-Сибирского моря): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Якутск, 1996, 24 с.
- Разумов С.О.** Модель динамики льдистых берегов арктических морей в стационарных климатических условиях // Материалы Второй конф. геокриологов России. Т. 2. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, с. 262–269.
- Советская Арктика.** М., Наука, 1970, 526 с.
- Холодов А.Л., Ривкина Е.М., Гиличинский Д.А. и др.** Оценка количества органического вещества, поступающего в Арктический бассейн при термоабразии побережья морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 3, с. 3–12.
- Шер А.В.** Природная перестройка в Восточно-Сибирской Арктике на рубеже плейстоцена и голоцена и ее роль в вымирании млекопитающих и становлении современных экосистем (Сообщение 1) // Криосфера Земли, 1997, т. I, № 1, с. 21–29.
- Шур Ю.Л., Васильев А.А., Вейсман Л.И. и др.** Новые результаты наблюдений за разрушением берегов в криолитозоне // Береговые процессы в криолитозоне. Новосибирск, Наука. Сиб. отд-ние, 1984, с. 12–19.
- Anderson T.W., Goodman L.A.** Statistical inference about Markov chains // Ann. Math. Statistics, 1957, No. 28, p. 89–110.
- Atkinson D.E., Solomon S.M.** A circum-arctic environmental forcing database for coastal morphological prediction: development and preliminary analyses // Rep. on Polar and Marine Res., 2003, vol. 443, p. 19–23.
- Elfeki A.M.M., Dekking F.M.** A Markov chain model for subsurface characterization: theory and applications // Math. Geol., 2001, vol. 33, No. 5, p. 569–589.
- Ferrero C.D., Gallagher K.L.** Stochastic thermal history modeling 1: constraining heat flow histories and their uncertainty // Marine and Petroleum Geol., 2002, No. 19(6), p. 633–648.
- Harbaugh J.W., Bonham-Carter G.** Computer simulation in geology. N. Y., Wiley Intersci., 1970, 327 p.
- Narin R.B., Solomon S.M., Kobajashi N., Virdrine J.** Development and testing of a thermal-mechanical numerical model for predicting arctic shore erosion process // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Permafrost, Yellowknife, Canada, 1998, p. 789–795.
- Ostroumov V.** Coastal dynamics during the erosion of the ice complex and Taber permafrost deposits: a model based on the fragmentary stationary matrixes of the transient probabilities // Rep. on Polar and Marine Res., 2003, vol. 443, p. 87–88.
- Solomon S.M.** A new shoreline change database for the Mackenzie-Beaufort Region, NWT, Canada // Ibid., p. 108–109.
- Vasiliev A.A., Kanevskiy M.Z., Cherkashov G.A., Vanshtein B.G.** Coastal dynamics at the Barents and Kara Sea key sites // Geo-Marine Lett., 2005, No. 25, p. 110–120.
- Vistelius A.B.** Studies in mathematical geology. N. Y., Consultants Bureau, 1967, 294 p.

Поступила в редакцию
26 июня 2006 г.