**СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ**

Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 3, с. 3-12 **www.izdatgeo.ru**

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.350.54 (268.52+61)

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА, ПОСТУПАЮЩЕГО В АРКТИЧЕСКИЙ БАССЕЙН ПРИ ТЕРМОАБРАЗИИ ПОБЕРЕЖЬЯ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ И ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО

А.Л. Холодов, Е.М. Ривкина, Д.А. Гиличинский, Д.Г. Федоров-Давыдов, С.В. Губин, В.А. Сороковиков, В.Е. Остроумов, С.В. Максимович

Институт физ.-хим. и биол. проблем почвоведения РАН, 142290, Московская обл., Пущино, Россия

В статье дана оценка количества органического углерода, поступающего в Полярный бассейн при абразии морского побережья восточного сектора Арктики. Оценен вклад многолетнемерзлых пород, современных почв и наземного растительного покрова. Определено содержание $C_{орг}$ в разных генетических типах четвертичных отложений и современных почв. Расчет запасов углерода проводился с учетом объемной льдистости массива мерзлых отложений. Установлено, что за счет термоабразии в море Лаптевых и Восточно-Сибирское за год выносится до 1,8 млн т органического углерода. Проведенные исследования дают основания предполагать, что большая часть органического вещества донных осадков этих морей является аллохтонной. Исследование базируется на обширном фактическом материале, полученном в результате многолетних работ на приморских низменностях Якутии.

Органическое вещество, многолетнемерзлые породы, мерзлотные почвы, термоабразия морских берегов, арктический бассейн

ESTIMATION OF THE ORGANIC CARBON INPUT INTO ARCTIC OCEAN DUE TO EROSION OF LAPTEV AND EAST-SIBERIAN SEASHORE

A.L. Kholodov, E.M. Rivkina, D.A. Gilichinsky, D.G. Fyodorov-Davydov, S.V. Gubin, V.A. Sorokovikov, V.E. Ostroumov, S.V. Maksimovich

Laboratory of Soil Cryology, Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science RAS

Estimation of possible organic input into arctic basin due to coastal thermal erosion in Eastern Arctic was carried out. The content of C_{org} for different types of Quaternary deposits and modern soil was determined. Influence of modern soil, vegetation and volumetric ice content on amount of C_{org} outflow was taken in to account. It has been determined that the supply of coastal erosion in to organic budget of Arctic basin can reach 1,8 mln tons per year. Most organic matter in marine sediment in Laptev and East-Siberian seas is allochthonous. Current research is based on the data obtained during works on the Yakutian coastal lowlands.

Organic matter, permafrost, frozen soil, coastal erosion, Arctic basin

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей особенностью многолетнемерзлых дисперсных четвертичных отложений восточного сектора Российской Арктики является высокое содержание в них захороненного органического вещества (ОВ) (главным образом растительных остатков, корешков, гумифицированной органики и т.д.) и углеродсодержащих биогенных газов (метана и углекислоты). Накопление ОВ в мерзлых породах происходило на протяжении геологически длительного времени (сотни тысяч лет). При протаивании многолетнемерзлых пород погребенный углерод заново вовлекается в современный биогео-

химический круговорот [*Ривкина и др., 1993; Семилетов, 2000*].

Рис. 1. Обзорная карта района исследований.

Задачей настоящего исследования являлась предварительная оценка общего количества углерода, поступающего в Полярный бассейн при термоабразии побережий моря Лаптевых и Восточно-Сибирского. Общее количество складывается из запасов органического вещества (ОВ), захороненного в многолетнемерзлых породах, органического вещества современных почв и биомассы напочвенных покровов. Для его оценки определялось содержание $C_{орг}$ как в керне многолетнемерзлых пород различного генезиса, слагающих береговые обрывы, так и в образцах современных тундровых почв и напочвенных покровов, отобранных в исследуемой части арктического побережья.

Помимо органического вещества почв и пород при термоабразии берегов происходит и высвобождение углерода, содержащегося в биогенных газах. Для оценки количества их возможного выброса в атмосферу определена концентрация метана и углекислоты в многолетнемерзлых породах различного генезиса.

РАЙОН И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые работы велись на трех ключевых участках: Быковском полуострове на побережье моря Лаптевых (129°30' в.д., 71°40' с.ш.), на м. Святой Нос в пограничной зоне моря Лаптевых и Восточно-Сибирского (140°10' в.д., 72°55' с.ш.) и м. Чукочий (159°55' в.д., 70°05' с.ш.), на побережье Восточно-Сибирского моря (рис. 1). Все эти участки расположены в пределах приморских низменностей Якутии. Регион представляет собой аккумулятивную равнину, с юга ограниченную горными сооружениями хребтов Верхоянского, Черского и Колымского нагорья, а с севера - Северным Ледовитым океаном. На протяжении позднего кайнозоя территория испытывала общее опускание [*Drachev, 2000*], что обусловило накопление здесь мощной толщи рыхлых четвертичных отложений. Четвертичные отложения приморских низменностей подробно описаны в литературе [*Романовский, 1977; Архангелов и др., 1979, 1981; Томирдиаро, 1982; Каплина, 1981; Каплина, Ложкин, 1979, 1982; Конищев, Колесников, 1981; Конищев, 2002*; и др.]. Поэтому ниже мы приведем лишь краткую характеристику пород, слагающих береговые обрывы моря Лаптевых и Восточно-Сибирского.

В пределах исследуемого региона преобладают два основных типа ландшафтов и связанных с ними комплексов четвертичных отложений.

Первый тип ландшафта представляет собой остатки поверхности позднеплейстоценовой озерно-аллювиальной равнины, сложенной синкриогенными отложениями ледового комплекса ($l\text{-}alQ_{III}$) [*Шер, 1971; Слагода, 1988; Куницкий, 1989*; и др.] (рис. 2-4). Данный ландшафт в приморской части характеризуется абс. отм. 25-50 м над ур. моря. Среднегодовая температура пород в пределах этой поверхности составляет в среднем -11°С, изменяясь от -10 до -15°С в зависимости от географической широты [*Геокриология СССР, 1989*]. Почвенный покров в пределах этого типа ландшафта - типичный тундровый криозем. Отложения представлены средним пылеватым суглинком (по классификации В.В. Охотина) с объемной льдистостью до 50%, однако за счет ледяных жил льдистость массива может достигать 80-90 %, в среднем составляя 70-75 % (рис. 5). Лед, содержащийся в этих отложениях (как сегрегационный, так и повторно-жильный), - ультрапресный, преимущественно гидрокарбонатно-натриевого состава. Подошва ЛК зачастую залегает на отметках до 15 м ниже ур. моря [*Слагода, 1988; Куницкий, 1989; Григорьев, Куницкий, 2000*]. В силу особенностей образования (при осадконакоплении постоянно происходил переход нижней части СТС в многолетнемерзлое состояние) данные отложения насыщены недоразложившимся органическим веществом (рис. 6, 7).

Второй тип ландшафта представляет собой аласные котловины. Формирование этого типа ландшафта связано с начавшимися 11-13 тыс. лет назад процессами протаивания ледового комплекса. Абсолютные отметки поверхности - от 5 до 25 м. Среднегодовая температура пород - -9...-10 °С. Ландшафт характеризуется почвенным покровом, представленным глееземом торфянистым тундровым. В пределах таких участков развиты отложения аласного комплекса. В этот комплекс входят (сверху вниз):

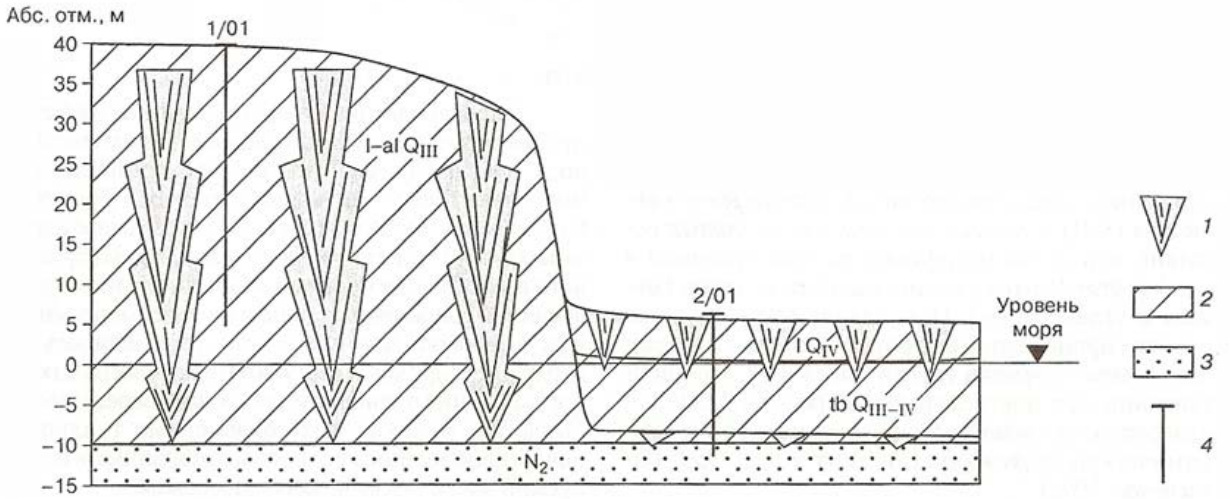

Рис. 2. Схематический разрез четвертичных отложений урочища Мамонтовый Хайата на Быковском полуострове (побережье моря Лаптевых).

1 — сингенетические жилы льда, *2* — супесь, *3* — песок, *4* — скважины.

а) собственно аласные (голоценовые озерно-болотные) отложения мощностью от 1 до 4-5 м (l Q_{IV}). Они представлены легким пылеватым суглинком. Объемная льдистость - от 40 до 50 %. Криогенные текстуры преимущественно слоистые и поясковые;

б) таберальный слой (tb Q_{IV}), представляющий собой оттаявшие и переотложенные отложения ЛК. По грансоставу это тяжелая пылеватая супесь с объемной льдистостью - 30-40 %. Криогенные текстуры преимущественно массивные. Мощность слоя зависит от мощности массива ЛК в конкретной точке;

в) остатки ледового комплекса мощностью первые метры (см. рис. 2, 4). Все отложения ультрапресные гидрокарбонатно-кальциевого (отдельные прослои сульфатно-кальциевого) состава. Преобладание среди катионов Ca^{2+}, по-видимому, связано с промывным режимом при осадконакоплении.

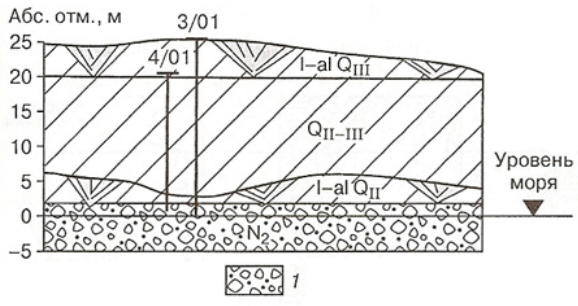

Рис. 3. Схематический разрез четвертичных отложений м. Св. Нос (побережье моря Лаптевых).

1 — песок с галькой и гравием. Остальные усл. обозн. см. рис. 2.

В разрезах береговых обрывов в данном регионе также присутствуют среднеплейстоценовые отложения кучугуйской свиты (Q_{II-III}) [*Романовский, 1961; Иванов, 1972; Конищев, Колесников, 1981; Никольский и др., 1999*] (см. рис. 3). Генезис этих отложений до сих пор является дискуссионным. По грансоставу эти осадки также относятся к легким пылеватым суглинкам и характеризуются практически полным отсутствием частиц песчаной фракции. Криогенная текстура преимущественно массивная, льдистость - порядка 30 % (см. рис. 5). Отложения, предположительно, эпикриогенные. При динамических нагрузках проявляют тиксотропные свойства.

В центральной и восточной частях региона (Ойягосский яр и Колымская низменность) в разрезе появляются среднеплейстоценовые (1-a1 Q_{II}) [*Конищев, Колесников, 1981; Никольский и др., 1999*] озерно-аллювиальные отложения (см. рис. 3). Эти осадки также носят черты синкриогенного формирования.

В нижних частях и под урезом береговых обрывов восточной части региона (Колымская низменность, о. Новая Сибирь) встречаются прибрежно-морские отложения, предположительно средне-верхнеплейстоценового (казанцевского) возраста (m Q_{II-III}) (см. рис. 4).

Ведущим процессом, формирующим современный облик береговой линии арктических морей в исследуемом регионе, является термоабразия. Особенно активно развивался этот процесс на втором этапе позднеплейстоцен-голоценовой трансгрессии (5 тыс. лет назад - современность). За это время береговая линия, в основном за счет размыва, переместилась на юг на 100-300 км и приняла современные очертания [*Романовский и др., 1999; Bauch et al., 2001*]. Формирование «термокарстовых лагун», существенно увеличивающих изрезанность побережья, способствовало столь высоким темпам

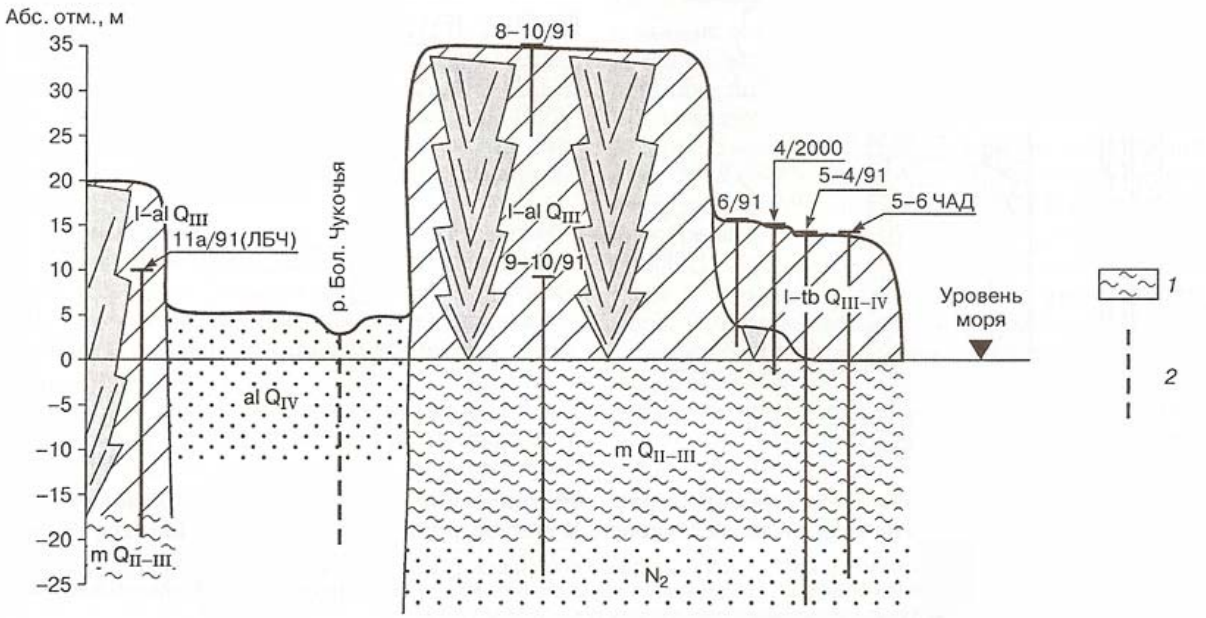

Рис. 4. Схематический разрез четвертичных отложений м. Чукочий (побережье Восточно-Сибирского моря).

1 — алеврит, *2* — зона предполагаемого тектонического разлома. Остальные усл. обозн. см. рис. 2.

термоабразии [*Романовский и др., 1999*]. В настоящее время размыву подвергается не только береговая линия континента, но и, более активно, острова, представляющие собой останцы «ледового комплекса». Так уже в историческое время были размыты острова Васильевский, Семеновский, Диомида, Аэрофотосъемки и т.д. [*Churun, Timokhov, 1995; Гаврилов, Тумской, 2002; Гаврилов и др., 2003*]. Таким образом, абразия побережья является одним из основных поставщиков материала (в том числе органического вещества) в Арктический бассейн. Средняя скорость этого процесса в исследуемом регионе составляет 2 м/год по фронту отступания [*Are, 1998, 1999; Разумов, 2001*]. Согласно нашим исследованиям, проводимым с 1984 г. на м. Чукочий, средняя скорость отступания берега здесь составляет 4,3 м/год (табл. 1) на участке, подмываемом р. Чукочья, и около 2 м/год - со стороны моря. При этом необходимо учитывать блоковый характер обрушения берегов, что приводит к большому разбросу (от 0 до 10 и более метров в год) скоростей термоабразии в разные годы. Протяженность размываемой береговой линии оценивается в 1000-1300 км по морю Лаптевых [*Are, 1998*] и порядка 2000 км в Восточно-Сибирском [*Павлидис и др., 1998*].

Другой важный процесс, имевший место на протяжении всего голоцена, - размыв морского дна. Особенно активен этот процесс на участках мелководных банок (Васильевская, Семеновская и т.д.), возникших на месте разрушенных термоабразией островов - останцов ЛК. Глубины моря на этих участках составляют 10-15 м, т.е. не превышают глубин сезонного пикноклина [*Churun, Timokhov, 1995; Zakharchuk, 1999; Дмитренко и др., 2001; Гаврилов и др., 2003*]. На этих мелководных участках акватории морское дно находится в зоне активного волнового воздействия. Согласно предварительным результатам математического моделирования, в год может оттаивать и размываться слой субмаринных мерзлых пород мощностью до 0,5 м. В результате происходит переход тонких (глинистых и пылеватых, а также ОВ) фракций во взвешенное состояние [*Дмитренко и др., 2001*]. Следствием этого является преобладание песчаных фракций в отложениях верхнего литостратиграфического комплекса (ЛСК) в береговой зоне и на мелководных участках. Тогда как на глубинах больше 15 м в донных осадках преобладают частицы пылеватой (алевритовой) фракции [*Кошелева, Яшин, 1999*]. Этот процесс также приводит к вовлечению органического вещества из субмаринных мерзлых пород в современный биогеохимический цикл. Оценка вклада этого фактора в общий запас углерода Арктического бассейна требует отдельных исследований.

Таблица 1. **Динамика отступания береговой линии по данным одного створа (м. Чукочий, устье р. Бол. Чукочья, ледовый комплекс)**

1984	1988	1990	1991	1994	1999	Годы
0	14	11	3	15	22	м

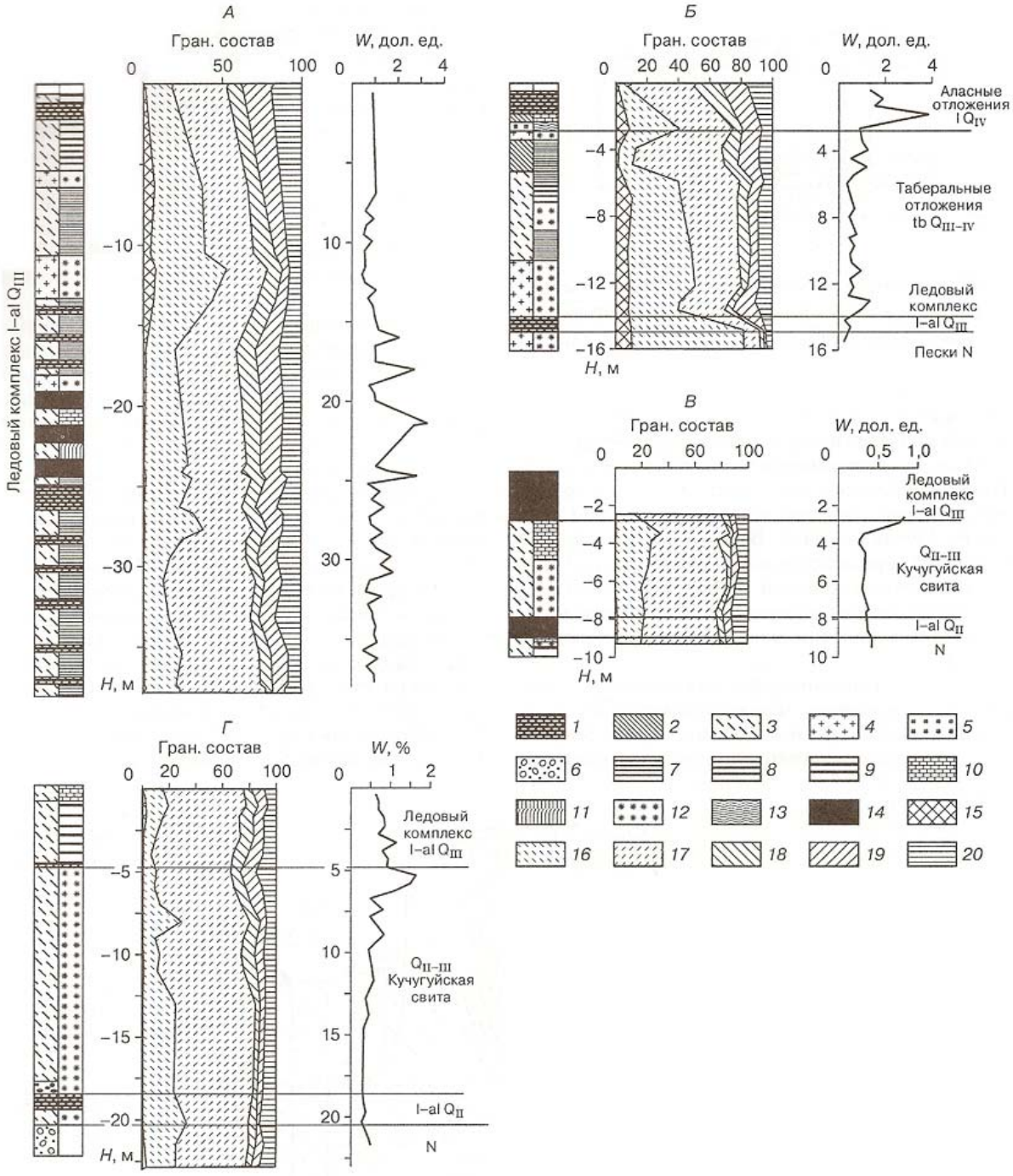

Рис. 5. Литология, криогенное строение, гранулометрический состав и весовая влажность отложений, слагающих береговые обрывы на Быковском полуострове (*А* и *Б*) и м. Св. Нос (*В* и *Г*).

А — отложения ледового комплекса (скв. 1/01), *Б* — аласного комплекса (скв. 2/01), *В* и *Г* — слоистая толща, включающая позднеплейстоценовый ледовый комплекс, среднеплейстоценовые отложения кучугуйской свиты, среднеплейстоценовый ледовый комплекс и подстилающие неогеновые отложения (скв. 3/01 и 4/01).

Литология: 1— ледогрунт, *2* — суглинок, *3* — супесь, *4* — песок, *5* — торф, *6* — песок с галькой. *Криотекстуры*: *7* — слоистая микрошлировая , *8* — слоистая тонкошлировая, *9* — слоистая мелкошлировая, *10* — сетчатая, *11* — вертикально-слоистая тонкошлировая , *12* — массивная, *13* — волнисто-слоистая тонкошлировая, *14* — лед. *Гранулометрический состав*, частицы размером: *15* — 1—0,25 мм; *16* — 0,25—0,05 мм; *17* — 0,05—0,01 мм; *18* — 0,01—0,005 мм; *19* — 0,005—0,001 мм; *20* —< 0,001 мм.

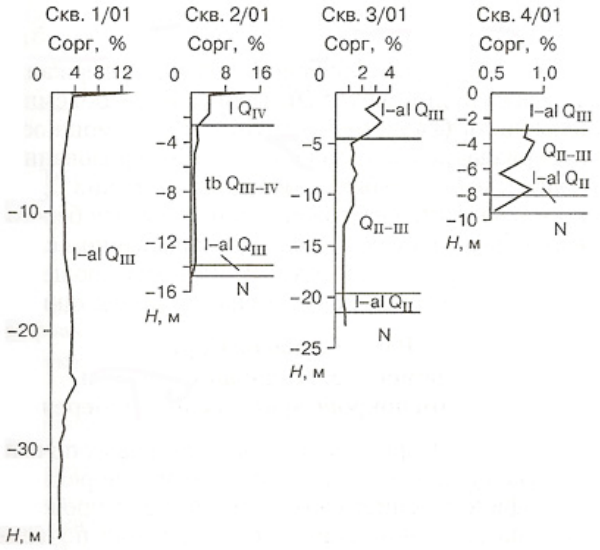

Рис. 6. Содержание органического углерода по глубине в скважинах на Быковском полуострове (1/01 и 2/01) и м. Св. Нос (3/01 и 4/01).

Расположение скважин см. рис. 2 и 3.

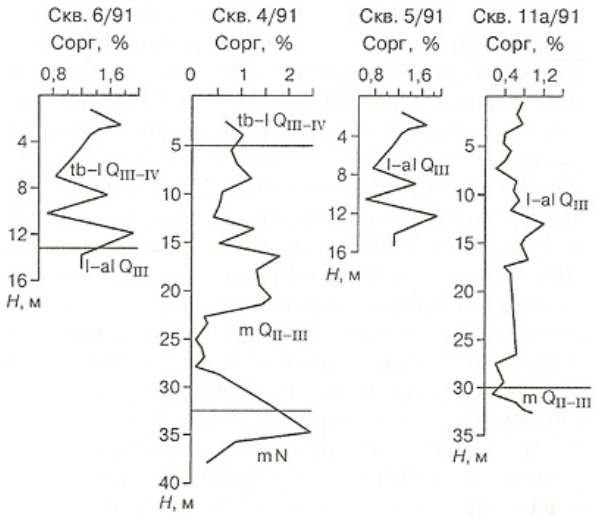

Рис. 7. Содержание органического углерода по глубине в скважинах на м. Чукочий.

6/91, 4/91, 5/91 — скважины в отложениях аласного комплекса; 11а/91 — скважина в отложениях ледового комплекса. Расположение скважин см. рис. 4.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ И СОВРЕМЕННЫХ ПОЧВАХ ПРИМОРСКИХ НИЗМЕННОСТЕЙ

Весовое процентное содержание $C_{орг}$ в образцах многолетнемерзлых пород и современных почв определялось по методу Тюрина (мокрое сжигание). Содержание углерода в единице объема сухого грунта (кг/м^3) рассчитывалось по формуле:

$$C_{уд} = C_{ан}\,\gamma_{ск},$$

где $C_{уд}$ - количество углерода в единице объема сухого грунта, $C_{ан}$ - определенное аналитически содержание углерода в образце (в долях единицы), $\gamma_{ск}$ - плотность скелета грунта.

Определение содержания органического вещества в многолетнемерзлых породах

Плотность скелета грунта при расчете принималась равной 1700 кг/м^3.

При расчете средневзвешенного содержания органического углерода в массиве учитывалась приведенная выше объемная льдистость мерзлых отложений ($W_{об}$). На данном этапе исследований принято среднее значение объемной льдистости массива - 50% (или 0,5 дол. ед.) для аласных отложений и 75 % (0,75 дол. ед.) для едомных.

$$C_{ср} = C_{уд}(1 - W_{об})\,h_{инт}/h,$$

где $C_{ср}$ - средневзвешенное значение содержания углерода в единице объема грунта; $W_{об}$ - объемная влажность (льдистость) грунта; $h_{инт}$ - мощность интервала керна скважины, охарактеризованная образцом; h - глубина скважины. Умножив $C_{ср}$ на протяженность береговой линии и высоту берегового обрыва на участке, охарактеризованном скважиной, получили массу углерода, поступающего в океан при отступании берега на единицу длины.

Расчет запасов $C_{орг}$ в современных тундровых почвах и растительном покрове арктического побережья

Запасы $C_{орг}$ подсчитаны в тундровых почвах м. Чукочий для различных элементов нанорельефа в профиле сезонноталого слоя. Расчеты проводились на основании данных о содержании почвенного органического вещества. При расчете запасов $C_{орг}$ мощность сезонноталого слоя на поверхности едомного водораздела считали равной: 50 см под задернованным бугорком, 30 см на наносклоне бугорка и 10 см в криогенной трещине. Для аласной поверхности мощность сезонноталого слоя считали равной: 35 см под задернованным бугорком, 45 см под пятном-медальоном и 40 см на склоне бугорка с пятном [*Brown et al, 2000*]. Объемный вес скелета почвы принимали: 0,15-0,20 г/см^3 для органогенных горизонтов, 0,8 для минеральных горизонтов в верхах профиля с рыхлым сложением, 1,3-1,4 для средней части профиля и 1,7 г/см^3 для его надмерзлотной части.

Для оценки общего количества углерода, высвобождающегося при разрушении почвенного профиля, необходим также учет содержания углерода в наземных биогеоценозах. При его подсчете принималось, что органический углерод в мертвых и живых растительных тканях составляет примерно 50 % от массы.

Таблица 2. **Содержание Сорг в различных типах четвертичных отложений приморских низменностей Якутии**

Тип отложений	Содержание Сорг			Станд. откл.
	выборка	среднее, %	модальное значение	
Ледовый комплекс (l-al Q_{III})				
Быковский полуостров и м. Св. Нос	23	2,55	2,28	0,81
м. Чукочий	27	1,65	1,89	0,24
Аласный комплекс				
Собственно аласные отл. (Быковский полуостров) l Q_{IV}	4	2,92	–	–
Таберальные отл. (Быковский полуостров) tb Q_{III-IV}	6	0,99	1,22	0,21
Таберальные отл. (м. Чукочий) tb Q_{III-IV}	29	1,29	1,41	0,39
Кучугуйская свита (Q_{II})				
м. Св. Нос	17	0,99	1,36	0,32
Морские отложения (m Q_{II-III})				
м. Чукочий	45	0,92	0,54	0,52

Определение содержания метана и углекислого газа в мерзлых породах

Метан и углекислый газ в многолетнемерзлых породах определялись методом "head space" сразу же после извлечения керна из скважины. Далее концентрация метана измерялась на полевом газовом хроматографе (ХПМ-4) с пламенно-ионизационным детектором, а CO_2 на инфракрасном анализаторе (Infralit). Затем, с учетом плотности скелета грунта эти значения пересчитывались на общее содержание $C(CH_4)$ и $C(CO_2)$ в единице объема породы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание органического углерода в мерзлых толщах

Распределение органического вещества в мерзлых толщах основных стратиграфических горизонтов восточного сектора Арктики показано на рис. 6, 7 и в табл. 2, 3. В табл. 2 приведены результаты первичного статистического анализа данных. Для тех типов отложений, которые были охарактеризованы достаточно полно, определили среднее значение содержания углерода в образце, модальное (наиболее часто встречаемое) значение и стандартное отклонение. В случае малого количества определений (например, аласные отложения l Q_{III-IV} м. Быковский) рассчитывалось только среднее арифметическое значение.

Таблица 3. **Содержание Сорг в многолетнемерзлых породах по данным бурения на побережье моря Лаптевых и Восточно-Сибирского**

Скв.	Район	Тип разреза	Глубина, м	Сорг, кг/м^3	Сорг, кг/м^2
1/01	Быковский полуостров	Ледовый комплекс	38,0	11,2	425,0
2/01	Быковский полуостров	Аласный комплекс	16,0	12,2	194,6
3/01	м. Св. Нос	Ледовый комплекс (Q_{II-III})	23,0	5,5	125,8
4/01	м. Св. Нос	Кучугуйская свита (Q_{II})	9,5	3,4	32,5
2/91	м. Чукочий	Олерская свита (N-Q_I)	4,5	71,1	319,7
3/91	м. Чукочий	Аласный комплекс	3,0	8,2	24,7
4/91	м. Чукочий	Морские осадки (Q_{III})	37,5	8,6	321,4
5/91	м. Чукочий	Аласный комплекс	15,0	11,2	167,7
6/91	м. Чукочий	Аласный комплекс	14,5	24,7	358,5
8/91	м. Чукочий	Аласный комплекс	3,7	11,0	40,7
10/91	м. Чукочий	Ледовый комплекс	4,5	5,9	26,7
11/91	оз. Якутское	Морские осадки	37,0	2,4	89,4

Отложения «ледового комплекса» характеризуются средним содержанием углерода от 2,55 (Быковский полуостров) до 1,65 % (м. Чукочий) (см. табл. 2). Эти данные хорошо согласуются с результатами исследований, проведенных в рамках российско-немецкого проекта "Laptev Sea System" [*Schiermeister et al., 2002*]. Необходимо отметить, что большой вклад в запасы углерода ЛК вносят погребенные почвы. Так, в обнажении на м. Чукочий выделяется шесть горизонтов погребенных почв (рис. 8). При фоновом значении $C_{орг}$ в едомных осадках порядка 1% в погребенных почвах запасы углерода достигают 3% и более. Схожая ситуация отмечается и на Быковском полуострове. Повышенное содержание $C_{орг}$ в средней части разреза едомы - до 4-5%, по нашим данным (см. рис. 6), а, возможно, и до 10-12%, по данным других исследователей [*Schiermeister et al., 2002*], по-видимому, связано с горизонтами погребенных почв, сформировавшихся в каргинское время.

Расчет запасов $C_{орг}$, поступающего в арктический бассейн в результате абразии побережья, приведен в табл. 3.

При пересчете весового содержания $C_{орг}$ в запасы углерода в массиве отложений получены следующие результаты.

В 1 м^3 отложений едомной свиты в среднем содержится 5-12 кг углерода. Учитывая высоту берегового клифа (20-40 м), при отступании на 1 м береговой линии протяженно-

стью 1 м в море выносится 100-480 кг органического углерода.

Участки побережья, представленные аласным комплексом, характеризуются меньшим запасом органического вещества (8-12 кг/м^3). Наряду с меньшей высотой аласных береговых обрывов это приводит к тому, что поступление органического вещества при размыве 1 м^2 побережья составляет на этих участках 8-195 кг.

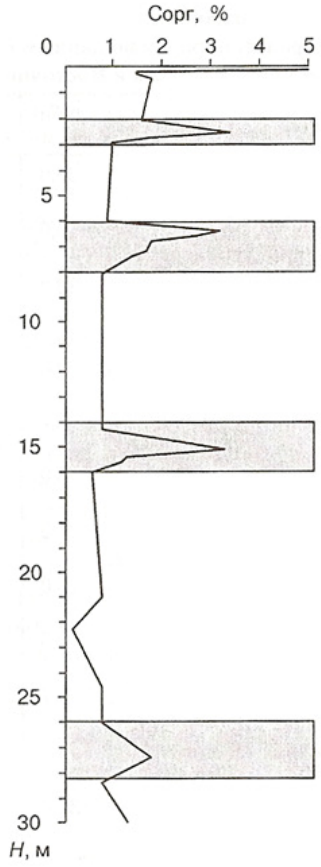

Рис. 8. Содержание органического углерода в отложениях ледового комплекса и в погребенных в нем почвах (м. Чукочий, побережье Восточно-Сибирского моря).

Серым выделены горизонты погребенных почв.

В пределах аласов основная часть запасов органического вещества (2,92 % или 24 кг/м^3) сосредоточена в верхних 3-4 м разреза (см. рис. 3), представленных голоценовыми озерно-болотными осадками. Пачка таберальных отложений характеризуется меньшим содержанием $C_{орг}$ по сравнению с исходным материалом ледового комплекса (см. табл. 2). Так, в массиве едомной свиты на п-ове Быковский запасы органического углерода в среднем составляют 22 кг/м^3, а в 10-метровом слое таберальных отложений, сформировавшемся при протаивании 50-метрового ледового комплекса, содержание углерода колеблется от 3 до 10 кг/м^3. Таким образом, при протаивании ледового комплекса под термокарстовым озером может происходить полное разложение половины законсервированного в нем органического вещества.

Близкими к таберальным отложениям значениями содержания $C_{орг}$ характеризуются также отложения кучугуйской свиты и казанцевские морские осадки. В них запасы органического углерода составляют 0,99 (8,4) и 0,92% (7,8 кг/м^3) соответственно.

Таблица 4. **Содержание Corг в раличных компонентах надземного тундрового биогеоценоза м. Чукочий**

Компонент биогеоценоза	Масса углерода (кг/м^2)
Надземная фитомасса (живая)	0,26
Ветошь	0,04
Рыхлый войлок	0,12
Корни и корневища (живые и мертвые)	0,41
Итого	0,83

Таблица 5. **Содержание Corг в различных типах современных почв в районе устья р. Бол. Чукочья**

Тип почвы	Мощность СТС, м	Сред. содерж. Corг, кг/м^3	Corг в СТС, кг/м^2
Криозем	0,51	22,11	11,39
Глеезем	0,42	21,02	8,83
Маршевые почвы	0,48	19,23	9,23
Торфянистые почвы полигонального болота	0,51	40,37	20,59

Содержание органического углерода в почвах

Результаты расчетов запасов $C_{орг}$ в современных почвах приведены в табл. 4 и 5. Для криоземов, развитых на водораздельной едомной поверхности, запасы $C_{орг}$ составляют 22,11 кг/м^3. Учитывая, что средняя мощность СТС в пределах этого ландшафта составляет 0,51 м, запасы углерода на 1 м^2 территории в почвенном профиле достигают 11,39 кг/м^2.

Для глееземов, развитых на поверхности аласов, запасы $C_{орг}$ составляли 21,02 кг/м^3, что при мощности СТС - 0,42 см дает 8,83 кг/м^2.

Кроме того, в районе исследований были получены данные о содержании углерода в торфянистых почвах полигонального болота (см. табл. 5).

Близкие значения по содержанию органического углерода получены Д.А. Замолодчиковым по побережью Берингова моря в районе м. Св. Лаврентия и

Л.А. Фоминых [*1997*] по Колымской низменности. В органогенном горизонте почвенного профиля, мощность которого составляет в среднем 17 см (а в слое мощностью 1 см и площадью 1 м^2 содержится 0,5 кг $C_{орг}$), общее количество углерода составляет 8,0 кг/м^2. Таким образом, в 1 м^2 почвенного профиля побережья восточного сектора Арктики содержится 7,5-10,0 кг $C_{орг}$, представленного в основном торфянистым горизонтом и почвенным гумусом.

Общее количество органического углерода, поступающего в бассейн при разрушении 1 м^2 почвенного профиля, увеличивается в среднем менее чем на 1 кг за счет его содержания в надземных биогеоценозах (см. табл. 5) и составляет в итоге 9,83-12,39 кг.

Содержание углеродсодержащих газов в мерзлых толщах

Концентрация углекислого газа в мерзлых горизонтах отмечается повсеместно и колеблется от 1 до 20 мг/кг. Концентрация метана варьирует от 2 до 40 мг/кг, но носит дискретный характер. Распределение метана в вечной мерзлоте обусловлено генезисом толщ, а его слоистое распределение говорит об отсутствии диффузии этого газа в мерзлых толщах [*Rivkina et al., 2001*]. Метан обнаружен во всех образцах горизонтов озерного, болотного и морского генезиса, т.е. в толщах, благоприятных для метанообразования. Ни в одном из образцов русловой фации аллювия и ледового комплекса Колымской низменности (м. Чукочий), формировавшихся в криоаридных условиях верхнеплейстоценовых тундростепей, метан не был обнаружен (или присутствовали следы). Следовательно, при разрушении ледовых комплексов Колымской низменности дополнительной эмиссии метана в атмосферу не происходит [*Rivkina et al., 2001*]. В то же время при отступании на 1 м 25-метрового обрыва аласных отложений м. Чукочий длиной в 1 км высвобождается около 0,5 т метана.

При этом нынешние величины потоков углеродсодержащих газов (углекислоты и метана) из стенок мерзлых обнажений сопоставимы с параллельно измеренными величинами дыхания тундровых почв. При величине почвенного дыхания (CO_2) в летний период - 60-90 мг/(м^2·ч) величины потоков этого газа в атмосферу из вечно-мерзлых осадков в морских обрывах составляли 17-32 мг/(м^2·ч). Потоки метана в атмосферу с поверхности приморских тундровых ландшафтов составляют 0-250 мг/(м^2·сут.), а из стенок береговых обрывов - 40 мг/(м2·сут.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования нами были сделаны следующие выводы.

1. Среднее содержание $C_{орг}$ в грунтах исследуемого региона составляет порядка 10 кг/м^3.

2. Наибольшим содержанием $C_{орг}$ (24,82 кг/м^3) характеризуются озерно-болотные аласные отложения (l Q_{IV}).

3. Низкое содержание углерода в таберальных отложениях относительно исходных отложений ледового комплекса (0,99 и 2,55% соответственно) свидетельствует о возможности разложения до 50% органического вещества, захороненного в синкриогенных отложениях.

4. Учитывая протяженность береговой линии моря Лаптевых и Восточно-Сибирского, скорость термоабразии побережья, а также высоту берегового обрыва, количество углерода, поступающего вследствие этого процесса в Арктический бассейн, оценивается нами равным 1,8 млн т/год. Эта величина сопоставима с количеством органического вещества, выносимого в Северный Ледовитый океан реками (табл. 6). В этой же таблице приведено сравнение результатов, полученных авторами статьи, с оценками других авторов.

Таблица 6. **Оценка количества аллохтонного Сорг, поступающего в море Лаптевых и Восточно-Сибирское (т/год)**

Речной сток	Термоабразия	Автор
$0{,}84\cdot10^6$	$1{,}55\cdot10^6$	А.И. Данюшевская [*Органическое вещество, 1990*]
–	$1{,}6\cdot10^6$	Е.А. Романкевич [*Романкевич, Ветров, 2001*]
–	$2{,}35\cdot10^6$	В.А. Кошелева, Д.С. Яшин [*1999*]

5. Большую часть $C_{орг}$, поступающего в море при термоабразии, составляет органика, захороненная в многолетнемерзлых породах (порядка 1,69 млн т). Далее следует органическое вещество современных почв (0,1 млн т) и биомасса наземных растительных покровов (0,01 млн т).

6. Вынесенное ОВ аккумулируется в отложениях верхнего ЛСК донных осадков моря Лаптевых и Восточно-Сибирского. Среднее содержание ОВ в донных осадках этих морей составляет 1,0-1,5% [*Органическое вещество..., 1990*]. По оценкам, проведенным Д.С. Яшиным [*Кошелева, Яшин, 1999*], за 1000 лет в вышеназванных морях накапливается $0{,}661\cdot10^9$ т $C_{орг}$. Согласно нашим расчетам, за это же время

только за счет абразии берегов в Арктический бассейн поступает $1{,}8 \cdot 10^9$ т аллохтонного углерода. Часть его переходит в растворенное состояние, часть разлагается, однако, можно сказать, что большая часть $C_{орг}$ в донных осадках морей восточного сектора Арктики является аллохтонной.

7. При размыве мерзлых пород происходит эмиссия парниковых газов в атмосферу. Величина эмиссии составляет порядка 0,001 млн т/год.

В заключение необходимо отметить, что исследование будет продолжено. Основными задачами дальнейших работ будут: получение новых, статистически достоверных данных о содержании органического углерода как в вышеописанных, так и в других типах четвертичных отложений, оценка региональных особенностей запасов $C_{орг}$ в мерзлых толщах приморских низменностей и островов, а также изучение состава органического вещества многолетнемерзлых пород региона.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Романовскому за ценные замечания, позволившие улучшить редакцию статьи, а также Е.А. Гусеву за плодотворные консультации.

Настоящая работа проводилась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 01-05-65043; 03-05-64351). Данные по динамике отступания берега на участке м. Чукочий были получены в рамках работ по программе «Мировой океан» Российской академии наук. Изучение органического вещества современных почв было проведено в рамках программы CALM Национального научного фонда США (NSF).

Литература

Архангелов А.А., Кузнецова Т.П., Карташова Г.Г., Коняхин М.А. Генезис и условия формирования верхнеплейстоценовых льдистых алевритов Колымской низменности (на примере Чукочьего Яра) // Проблемы криолитологии. М., Изд-во МГУ, 1979, вып. VIII, с. 110-135.

Архангелов А.А., Кузнецова Т.П., Льянос-Мас, Михалев Д.В. Криолитогенез аласных отложений (на примере м. Чукочий) // Проблемы криолитологии. М., Изд-во МГУ, 1981, вып. IX, с. 125-138.

Гаврилов А.В., Тумской В.Е. Современные процессы криолитогенеза восточного побережья моря Лаптевых // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 1, с. 33-48.

Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В., Романовский В.Е. Распространение островов - реликтов ледового комплекса на Восточно-Сибирском арктическом шельфе // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 18-32.

Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под. ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, с. 515.

Григорьев М.Н., Куницкий В.В. Ледовый комплекс арктического побережья Якутии как источник наносов на шельфе // Тр. Арктич. регион. центра. Гидрометеорологические и биогеохимические исследования в Арктике. Т. II, ч. 1 / Под. ред. И.П. Семилетова. Владивосток, 2000, с. 109-116.

Дмитренко И.А., Холеман Е., Кириллов С.А. и др. Термический режим придонного слоя моря Лаптевых и процессы, его определяющие // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 3, с. 44-55.

Иванов О.А. Стратиграфия и корреляция четвертичных и неогеновых отложений субарктических равнин Восточной Якутии // Проблемы изучения четвертичного периода. М., Наука, 1972, с. 202-211.

Каплина Т.Н. История мерзлых толщ Северной Якутии в позднем кайнозое // История развития многолетнемерзлых пород Евразии. М., Наука, 1981, с. 153-181.

Каплина Т.Н., Ложкин А.В. Возраст аласных отложений Приморской низменности Якутии (радиоуглеродное обоснование) // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1979, № 2, с. 69-76.

Каплина Т.Н., Ложкин А.В. Возраст «ледового комплекса» Приморских низменностей Якутии // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1982, № 2, с. 84-95.

Конищев В.Н., Колесников С.Ф. Особенности строения и состава позднекайнозойских отложений в обнажении Ойогосский яр // Проблемы криолитологии. М., Изд-во МГУ, 1981, вып. IX, с. 107-117.

Конищев В.Н. Палеотемпературные условия формирования и деформации слоев ледового комплекса // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 1, с. 17-24.

Кошелева В.А., Яшин Д.С. Донные осадки Арктических морей России / Под ред. И.С. Грамберга. СПб., ВНИИОкеангеология, 1999, с. 286.

Куницкий В.В. Криолитология низовья Лены. Якутск, Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1989, с. 162.

Никольский П.А., Басилян А.Э., Симакова А.Н. Новые данные по стратиграфии верхнекайнозойских отложений в районе м. Святой Нос (побережье моря Лаптевых) // Ландшафтно-климатические изменения, животный мир и человек в плейстоцене и голоцене. М., 1999, с. 51-60.

Органическое вещество донных отложений полярных зон Мирового океана / Под ред. А.И. Данюшевской. Л., Недра, 1990, с. 280.

Павлидис Ю.А., Ионин А.С., Щербаков Ф.А. и др. Арктический шельф: Позднечетвертичная история как основа прогноза развития. М., ГЕОС, 1998, с. 187.

Разумов С.О. Моделирование эрозии берегов арктических морей в меняющихся климатических условиях // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 1, с. 53-60.

Ривкина Е.М., Самаркин В.А., Гиличинский Д.А. Метан в многолетнемерзлых породах Колымо-Индигирской низменности //Докл. РАН, 1993, вып. 323, № 3, с. 559-562.

Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М., Наука, 2001, с. 302.

Романовский Н.Н. О строении Яно-Индигирской приморской аллювиальной равнины и условиях ее формирования // Мерзлот. исслед. М., Изд-во МГУ, 1961, вып. 2, с. 129-139.

Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск, Наука, 1977, с. 213.

Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е. Озерный термокарст и его роль в формировании прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 3, с. 79-91.

Семилетов И.П. Парниковые газы в атмосфере Арктики: наземные и морские источники атмосферной двуокиси углерода и метана в Арктике // Тр. Арктич. регион. центра. Гидрометеорологические и биогеохимические исследования в Арктике. Т. II, ч. 1 / Под ред. И.П. Семилетова. Владивосток, 2000, с. 117-130.

Слагода Е.А. Петрографические особенности современных отложений береговой зоны моря Лаптевых // Исслед. мерзлых толщ и криогенных явлений. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1988, с. 11-21.

Томирдиаро С.В. Стратиграфия и криолитологические критерии расчленения отложений едомного комплекса Северо-Востока СССР // Четвертичные отложения Востока СССР. Магадан, СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1982, вып. 2, с. 6-9.

Фоминых Л.А. Особенности почвообразования в Колымских тундрах // Почвоведение, 1997, № 8, с. 917-925.

Шер А.В. Млекопитающие и стратиграфия плейстоцена Крайнего Северо-Востока СССР и Северной Америки. М., Наука, 1971, с. 310.

Are F. The contribution of shore thermoabrasion to the Laptev Sea sediment balance // Proc. of the 7th Intern. Conf. of Permafrost. Yellowknife, Canada, 1998, p. 25-31.

Are F. The role of coastal retreat for sedimentation in the Laptev Sea // Land-Ocean System in the Siberian Arctic. Dynamics and History. Berlin, Springer, 1999, p. 287-297.

Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E. et al. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin // Global and Planetary Change, 2001, No. 31, p. 125-139.

Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: Research designs and initial results // Polar Geography, 2000, vol. 24, No. 3, p. 258.

Churun V.N., Timochov L.A. Cold bottom water in the southern Laptev Sea // Reports on Polar Research, 1995, No. 176, p. 107-114.

Drachev S.S. Laptev Sea rifted continental margin: modern knowledge and unsolved questions // Polarforschung, 2000, No. 68, p. 41-50.

Rivkina E., Gilichinsky D., McKay C., Dallimore S. Methane distribution in permafrost: Evidence for an interpore pressure methane hydrate // Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources. Netherlands, Kluwer Academic Publisher, 2001, p. 487-496.

Schiermeister L., Siegert Ch., Kuznetsova T. et al. Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia // Quaternary International, 2002, No. 89, p. 97-118.

Zakharchuk E. Internal waves in the Laptev Sea // Land-Ocean System in the Siberian Arctic. Dynamics and History. Berlin, Springer, 1999, p. 43-52.

Поступила в редакцию 24 апреля 2003 г.

Ссылка на статью:

Холодов А.Л., Ривкина Е.М., Гиличинский Д.А., Федоров-Давыдов Д.Г., Губин С.В., Сороковиков В.А., Остроумов В.Е., Максимович С.В. **Оценка количества органического вещества, поступающего в Арктический бассейн при термоабразии побережья моря Лаптевых и Восточно-Сибирского** // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 3. С. 3-12.