

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СУБМАРИННОЙ МЕРЗЛОТЫ НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Н.Н. Романовский, А.В. Гаврилов, Г.П. Пустовойт, А.Л. Холодов, Х. Кассенс*,
Х.-В. Хуббертен**, Ф. Ниссен***

*Московский государственный университет, геологический ф-т, кафедра геокриологии,
119899, Москва, Воробьевы горы, Россия*

** GEOMAR, Киль, Германия*

*** Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Потсдамское отделение, Германия*

**** Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Бремерхафен, Германия,*

Приводятся данные о практически сплошном распространении реликтовых многолетнемерзлых пород (ММП) на шельфе моря Лаптевых. Представлены карты условий формирования и эволюции ММП на шельфе за позднплейстоцен-голоценовый гляциоэвстатический цикл. Приведены результаты компьютерного моделирования эволюции шельфовой мерзлоты и прогнозная карта ее распространения, составленная на основе расчетных и фактических данных.

Море Лаптевых, шельф, мерзлота, компьютерное моделирование

OFF-SHORE PERMAFROST DISTRIBUTION ON THE LAPTEV SEA SHELF

N.N. Romanovskii, A.V. Gavrilov, G.P. Pustovoit, A.L. Kholodov, H. Kassens*, H.-W. Hubberten**, F. Nissen***

Moscow State University, Department Geocryology, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia,

** GEOMAR, Kiel, Germany*

*** Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Potsdam Branch Germany*

**** Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven Germany*

Data about continuous distribution of relic permafrost on the Laptev Sea Shelf are cited. Maps of conditions of formation and evolution of permafrost on the shelf at Late Pleistocene-Holocene glacioeustatical cycle are presented. Results of computer modelling of the evolution of off-shore permafrost and forecasting map of its distribution, which was created on the basis of calculation and factual data, are cited.

Laptev Sea, shelf, permafrost, computer modelling

Наличие субмаринной льдосодержащей мерзлоты, сформировавшейся на протяжении последнего гляциоэвстатического цикла в прибрежной зоне шельфа моря Лаптевых, было известно с начала столетия. Здесь рядом исследователей было установлено, что острова, сложенные подземным льдом и многолетнемерзлыми породами (ММП), размываются и исчезают. На большинстве геокриологических карт субмаринная криолитозона показана или на основании общих соображений [Баранов, 1964; Жигарев, 1979; Фотиев, 1978], или по результатам расчетов по весьма упрощенным формулам [Соловьев и др., 1987; Неизвестнов, 1981; Геокриологическая карта СССР, 1997]. Результаты расчетов были подтверждены малым количеством фактических данных. Общей тенденцией, отраженной на картах, является наличие прерывистых и островных ММП. Их сплошность и мощность уменьшаются в направлении от современного берега до изоба-

ты -60 м. Только А.И. Фартышев (1993) прогнозировал наличие сплошной мощной мерзлоты на Лаптевском шельфе.

В результате исследований по русско-германской программе Laptev Sea System и другим работам получен ряд принципиально новых данных, свидетельствующих о почти сплошном распространении ММП на шельфе моря Лаптевых вплоть до бровки континентального склона. Новые сведения о температуре и минерализации морских вод показывают, что природная обстановка, несомненно, способствует сохранению ранее промерзших отложений в мерзлом состоянии.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПЕРВИЧНЫЙ АНАЛИЗ

Прямым показателем наличия льдистых ММП на небольших глубинах моря (до 20—30 м)

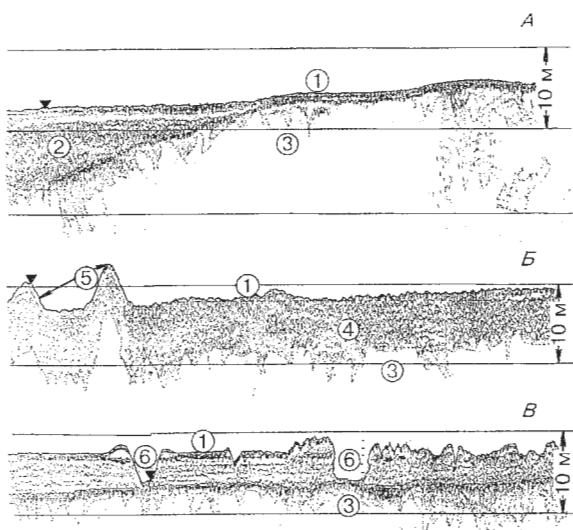


Рис. 1. Верхняя часть субмаринной мерзлоты на сейсмоакустических профилях.

Координаты и глубины точек: А — 77° с.ш., 130° в.д., Н — 65,4 м; Б — 77° с.ш., 120° в.д., Н — 71,1 м; В — 76° с.ш., 115° в.д., Н — 47,5 м; цифры в кружках: 1 — дно моря, 2 — охлажденные отложения палеодолин, 3 — мерзлые отложения, 4 — охлажденные осадки, 5 — субаквальные булгуньяхи, 6 — следы айсбергового выпаживания.

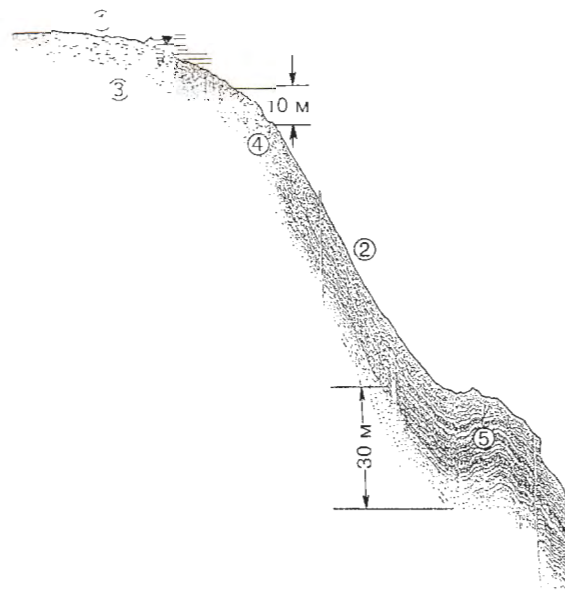


Рис. 2. Субмаринная мерзлота на бровке шельфа моря Лаптевых и на континентальном склоне.

Координаты точек: 78° с.ш., 155° в.д., Н — 110 м; цифры в кружках: 1 — шельф, 2 — континентальный склон, 3 и 4 см. на рис. 1; 5 — талые отложения.

явился мерзлый керн, в том числе с линзами чистого пресного льда [Dehn et al., 1995]. О практически сплошном распространении мерзлоты говорят сейсмоакустические данные, а также небольшое проникновение пробоотборников, даже турбовибрационных, при седиментологических исследованиях, обрывы кернов при их извлечении, результаты эхолокации дна [Reports..., 1994]. На рис. 1 и 2 представлены сейсмоакустические профили, полученные с помощью прибора Parasound System Paradigma с максимальной глубиной проникновения сигнала в дисперсные немерзлые отложения до 30 м. На этих и многих других профилях видны две отражающих поверхности: поверхность морского дна и вторая поверхность, которая фиксируется на 2—10 м ниже, практически непроницаемая для акустических волн. Эта поверхность, предположительно интерпретируемая как кровля ММП, практически повсеместно прослеживается в диапазоне глубин моря от 45 до 85—140 м. Последние глубины отвечают переходу шельфа в верхнюю часть материкового склона. На профилях фиксируются долинообразные углубления, являющиеся по ряду признаков субмаринными несквозными таликами (см. рис. 1-А-2), предположительно субаквальные булгуньяхи (рис. 1-Б-5), борозды айсбергового выпаживания (см. рис. 1-В-6), позволяющие судить о мощности немерзлых осадков, перекрывающих

ММП. Кроме этого на многих профилях выделяются секции с верхним слоем мощностью 5—10 м, представленным предположительно засоленными отложениями, которые содержат одновременно прослой и линзы льда, соленый поровый раствор и незамерзшую связанную воду. Такая интерпретация представляется вполне реалистичной, если учитывать, что насыщенные морской водой отложения промерзали при осушении шельфа при низких температурах. В настоящее время их температуры близки к температуре таяния засоленных отложений ($-1 \div -1,8^\circ\text{C}$). Непосредственного контакта с соленой морской водой у этих отложений нет, так как они перекрыты морскими немерзлыми осадками.

Мощность охлажденных осадков и пород, залегающих на кровле ММП между изобатами -10 и -50 м, исследовалась при помощи эхолокации дна. Эти данные показывают явную зависимость их мощностей от продолжительности существования тех или иных участков в субаквальном состоянии. Так, наименьшая мощность охлажденных отложений (менее 1 м) свойственна барам на месте размытых в историческое время островов, окружающим их мелководьям и площадям, с которых происходит вынос осадков; наибольшая мощность (более 3 м) характерна для дниц палеодолин и сопредельных территорий с глубинами моря -40 — -50 м, а также для площадей, где происходит современное осадконакопление.

УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ СУБМАРИННЫХ МЕРЗЛОТЫ И ТАЛИКОВ

Большую роль в формировании и эволюции мерзлых толщ в позднем плейстоцене и голоцене играли и играют температура и соленость морских вод, а также процессы размыва и аккумуляции осадков на дне моря [Арэ, 1980].

В прибрежной мелководной зоне распространены морские воды в разной степени распресненные речными и имеющие среднегодовые температуры от +1; +2; 0°C до -1°C. Здесь наблюдается наибольшее протаивание ММП под морем и формирование глубоких (до 50—150 м) несквозных субмаринных таликов. Последние установлены под проливами Дм. Лаптева [Теленев, 1981] и Санникова [Фартышев, 1993], в районе Ванькиной губы [Жигарев, 1979] и в других местах, где проводилось поисковое и разведочное бурение. На всех этих участках верхняя сильнольдистая часть разреза уничтожена термообработкой, что обусловило более глубокое протаивание сверху нижележащих слабльдистых, возможно засоленных пород.

Уничтожение верхнего горизонта мерзлой толщи, сложенной ледовым комплексом, путем термообработки и/или выноса донных осадков с обнажением и последующим растворением пресных подземных льдов — вообще важное условие оттаивания льдистых толщ. В местах накопления тонкодисперсных осадков при отрицательных среднегодовых температурах морской воды и донных осадков происходит „захоронение“ толщ, содержащих пресные подземные льды. Темп перехода мерзлых пород в охлажденные очень мал вследствие незначительных скоростей диффузии солей через пылеватые продукты разрушения ледового комплекса.

Севернее зоны распреснения речными водами, граница которых ассоциируется с глубинами 30—40 м [Dmitrenko, 1995], существует Великая Сибирская Полярная. В зимнее время Полярная является местом формирования молодого морского льда, выносимого на северо-запад, и холодных тяжелых рассолов [Dethleff, 1994; Churin et al., 1995]. Рассолы охлаждают придонные слои воды и донные осадки до температур -1; -1.5°C, предохраняя ММП периферийной части шельфа от оттаивания.

Вышеизложенные представления носят во многом предположительный характер и для их проверки необходимы натурные исследования и математическое моделирование. Моделирование субмаринной мерзлоты на Лаптевском шельфе осуществляется на основе новой палеогеографической модели формирования и эволюции криолитозоны этой акватории [Романовский и др., 1997], используемой при численном моделировании в качестве начальных и верхних

граничных условий, и последних данных о геологическом строении шельфа [Drachev et al., 1995].

Новая палеогеографическая модель, подробно описанная ранее [Романовский и др., 1997], учитывает: 1 — продолжительность существования разных частей шельфа в осушенном и затопленном состояниях в течение последнего гляциоэвстатического цикла; 2 — тепловое влияние моря до осушения и после затопления шельфа морскими водами с различной температурой и соленостью; 3 — скачки температур при осушении и затоплении шельфа; 4 — изменение среднегодовых температур пород шельфа во времени; 5 — наличие мерзлотно-температурной зональности; 6 — накопление синкриогенных субаэральных отложений с подземными льдами, имеющими температуру замерзания — таяния 0°C, на шельфе в период регрессии моря; 7 — затопление или размыв синкриогенных отложений на разных стадиях последней трансгрессии. За начальные условия принято допущение об отсутствии мерзлоты на Лаптевском шельфе в конце казанцевской трансгрессии. Вместе с тем отсутствие казанцевских морских отложений на побережье и наличие в основании некоторых береговых разрезов средне- и (или) раннеплейстоценовых синкриогенных отложений с повторно-жильными льдами свидетельствует о возможности существования на ряде участков шельфа доказанцевских ММП. Это приведет к увеличению мощности субаквальной мерзлоты по сравнению с модельной на тех участках современного шельфа, где массивы ММП сохранились в казанцевское потепление.

На основании использования палеогеографической модели и батиметрической карты была составлена схематическая карта изменения природной обстановки в период позднеплейстоценового гляциоэвстатического цикла на шельфе моря Лаптевых. По существу она является картой верхних граничных условий для математического моделирования (рис. 3). На ней выделены зоны с различной продолжительностью оголения шельфа и формирования субмаринной шельфовой мерзлоты и таликов. Кривые изменения температур на шельфе, приведенные на карте для каждой из выделенных зон в виде диаграмм, упрощены. На них не показаны флуктуации температур продолжительностью первые тысячи лет, практически не влияющие на положение подошвы ММП.

ГЕОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ШЕЛЬФА И ВЫБОР НИЖНИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для понимания современного распространения и мощностей субмаринной мерзлоты, а

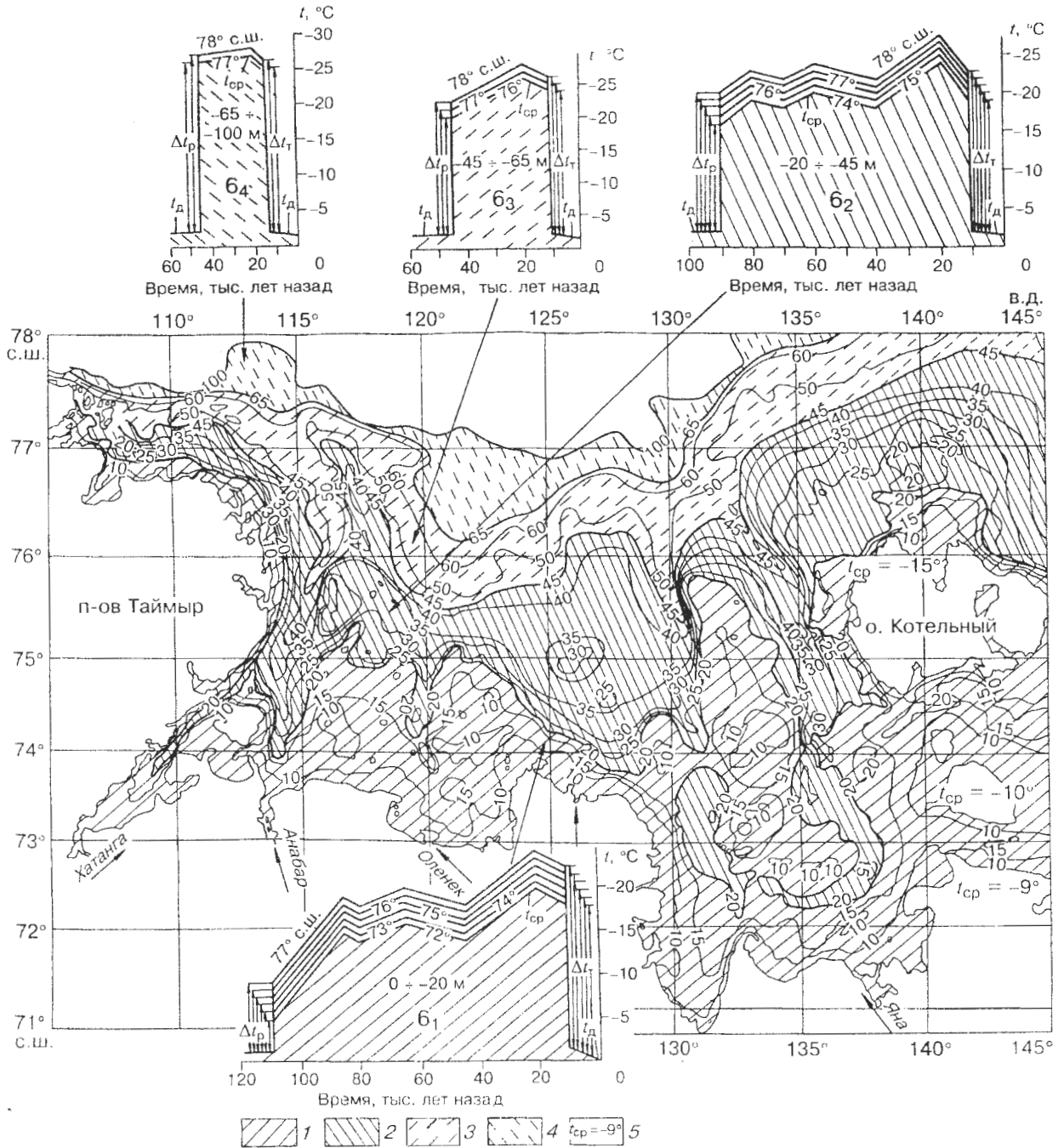


Рис. 3. Карта верхних граничных условий эволюции субмаринной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых:

1—4 — участки шельфа, выделенные по интервалам глубин и различающиеся по верхним граничным условиям и особенностям формирования мерзлоты: 1 — 0-20 м, 2 — 20-45 м, 3 — 46-65 м, 4 — 65-100 (120) м. 5 — современные среднегодовые температуры пород на побережье, °С; 6₁-6₄ — условия формирования ММП: t_{cp} — среднширотные среднегодовые температуры пород осушенного шельфа на протяжении периода промерзания, °С; Δt_p и Δt_r — скачки температуры на шельфе при морских регрессиях и трансгрессиях соответственно, °С; t_d — температура морской воды и дна моря, °С.

также положения и генезиса сквозных таликов на шельфе были использованы новейшие данные о его геологическом строении. В мезозое и кай-

нозое шельф моря Лаптевых испытывал тектоническую активизацию с образованием рифтовых структур, накоплением в опускавшихся бло-

ках многокилометровых (до 9—10 км) толщ отложений [Drachev et al., 1995]. В позднем кайнозое происходило слабо дифференцированное опускание и накопление тектонически мало дислоцированных осадков мощностью от 500 до 2000 м. В связи с этим Лаптевский шельф характеризуется неоднородностью строения и, как показывают материалы по другим рифтовым областям [Веселов и др., 1982], большим разнообразием в отношении плотности внутриземного теплового потока, а также широким проявлением сейсмических явлений.

Геолого-структурное районирование шельфа, проведенное для целей выбора характерных разрезов, состава и свойств отложений и нижних граничных условий при моделировании, основано на опубликованных данных [Drachev et al., 1995], с учетом внесенных С.С. Драчевым корректив по материалам, полученным в последние годы (рис. 4). На базе районирования был сделан

выбор типичных геологических разрезов и тепловых потоков из недр земли, которые необходимы для решения задачи Стефана [Общая геокриология, 1978] применительно к формированию и развитию шельфовой мерзлоты. Теплофизические свойства задавались для скальных пород в соответствии с данными В.Т. Балобаева [Балобаев, 1991], для морских осадков и отложений согласно публикациям Е.Н. Молочушкина и Р.И. Гаврильева и данным, полученным на кафедре геокриологии МГУ. Величины тепловых потоков принимались исходя из степени современной активности тектонических процессов. Были использованы данные [Балобаев, 1991; Каталог..., 1985] по однотипным структурам северо-востока Азии. Для областей рифтогенеза были приняты данные [Веселов и др., 1982]. Задаваемые значения тепловых потоков изменялись от 30 мВт/м² для неактивизированных структур Сибирской платформы до 80—100 мВт/м² и бо-

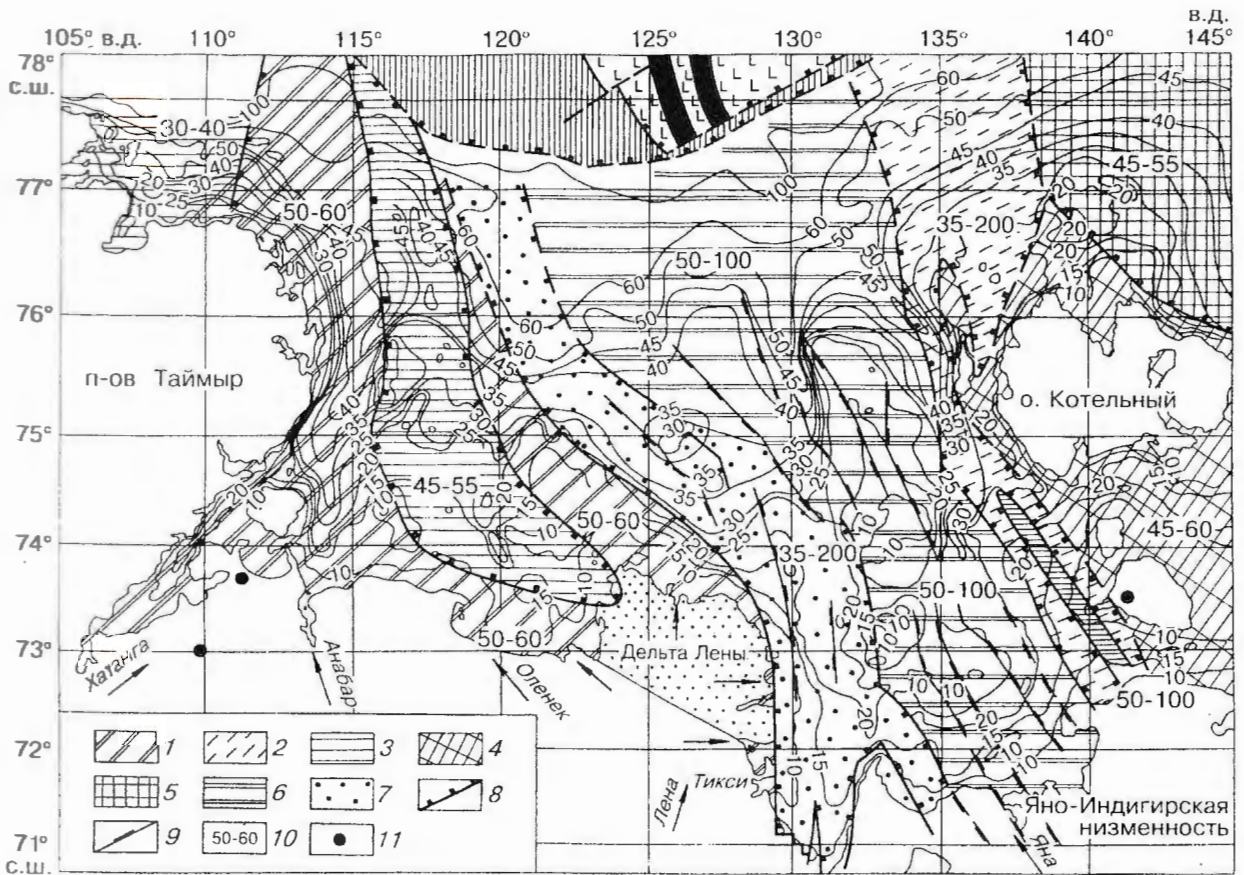


Рис. 4. Карта основных тектонических элементов шельфа моря Лаптевых (в соответствии с [Drachev et al., 1995]) и значения плотности геотермического потока мВт/м².

Мезозойские прогибы древних платформ: 1 — тектонические поднятия, 2 — тектонические опускания, 3 — щит эпипалеозойской платформы. Эпимезозойская плита: 4 — тектонические поднятия, 5 — тектонические опускания. Кайнозойские рифтовые зоны: 6 — тектонические поднятия, 7 — тектонические опускания. 8 — границы тектонических структур, 9 — основные разломы, 10 — значения плотности геотермического потока, мВт/м², 11 — глубокие скважины, в которых были определены значения плотности геотермического потока.

Таблица 1. Состав и свойства отложений, принятые для моделирования эволюции мерзлоты на шельфе моря Лаптевых

Интервал глубин, м	Состав	W, %	Плотность скелета, г/см ³	C _{об} , Вт·ч/(м ³ ·К)		λ, Вт/(м·К)		Q _φ , Вт·ч/м ³	t _φ , °С
				т	м	т	м		
<i>Опущенные тектонические блоки</i>									
0—10	Ил суглинистый	100	1,4	860	678	1,42	2,25	67226	-2
10—800	Суглинки, алевролиты	18—26	1,8—1,5	554—544	459—414	1,54—1,15	1,86—1,98	12100—17478	-2
		38	1,32	573	418	1,35	2,28	25546	
800—1500	Суглинки, песчаники	15,2	1,71	516	433	1,4	1,69	10252	-2
		23	1,6	547	429	1,5	2	15462	
1500—2000	Песчаники, алевролиты с галькой	16—22	1,85—1,64	553—549	468—436	2,23—1,69	2,95—2,38	10756—14789	-2
		26	1,5	544	414	1,74	2,64	17478	
<i>Поднятые тектонические блоки</i>									
0—10	Ил суглинистый	80	1,6	859	548	1,98	2,26	53000	-2
10—500	Суглинки, алевролиты	18—26	1,8—1,5	554—544	459—414	1,54—1,15	1,86—1,98	12100—17478	-2
		38	1,32	573	418	1,35	2,28	25546	
500—750	Пески, глины	11,5—22	1,53—1,6	443—454	376—422	1,7—1,35	2,63—1,28	7200—13980	-2
		23,7	1,56	541	420	1,44	1,98	24855	
750—2000	Песчаники, алевролиты с галькой	0,8—2	1,6—1,46	360—335	360—335	3,08—2,32		322—785	-2
		16	1,9	473	473	2,94		10218	

Примечание: Вверху ячейки даны значения свойств для стабильных блоков, внизу — для трещиноватых пород разломных зон; т — талые, м — мерзлые отложения.

лее в зонах крупных сейсмогенерирующих разломов рифтовых областей. Для Лаптевского шельфа было принято, что в пределах ненарушенных разломами блоках теплоток в геоструктурах поднятий составляют 50 мВт/м², а в опускающихся геоструктурах — 40 мВт/м². Соответственно для зон тектонических разломов приняты повышенные вдвое величины теплоток — 100 и 80 мВт/м². Моделирование эволюции мерзлых толщ осуществлялось по программе „Тепло“, разработанной Л.Н. Хрусталевым и его коллегами [Программа расчета..., 1994]. Расчеты проводились по одномерным моделям для каждого выделенного по геологическим и палеогеографическим показателям участка шельфа моря Лаптевых. Вертикальный размер модели составлял 2000 м. В расчетах принималось, что температура замерзания насыщенных морской водой отложений составляет -2°С, а температура оттаивания -1,5°С. Разница в температурах замерзания—таяния обусловлена тем, что при формировании ММП часть легкорастворимых солей отжимается из порового раствора, образуя линзы криопэггов. При опробовании донных голоценовых отложений в восточной части моря Лаптевых при глубине моря порядка 25 м температура осадков в верхнем немерзлом слое составляла -1,3°С, а нижележащих мерзлых -1,5°С. Последняя и была принята при расчете протаивания засоленных отложений, происходящего под влиянием геотерми-

ческого потока тепла как со стороны верхней поверхности мерзлоты, так и нижней. Теплофизические свойства отложений, принимавшиеся при расчетах, приведены в табл. 1. Некоторые результаты расчетов в виде кривых изменения во времени границ ММП — талые отложения и нулевых геоизотерм, в основном для наиболее типичного разреза при четырех значениях теплового потока представлены на рис. 5. Участки, для которых проводились расчеты эволюции мерзлоты на шельфе, результаты которых приведены на рисунке, располагаются на изобатах -20 и -45, -65 и -100 м и на широтах 72, 75, 76—77 и 78°, соответственно. Анализ этих и других расчетных данных показывает, что влияние периода промерзания, температур пород и внутриземного теплового потока на глубину промерзания примерно равноценно. Наиболее мощные ММП возможны к северо-востоку от Таймыра и к северу от Новосибирских о-вов, где продолжительность осушения шельфа была большой, температуры очень низкими, а тепловой поток вследствие консолидированности структур небольшим. Обращает на себя внимание существенная роль температуры морской воды в деградации засоленных ММП. При температурах -1,5; -2°С последние сохраняются в мерзлом состоянии, также как в случае существования в верхней части разреза синкриогенных отложений с пресными подземными льдами, имеющими температуру таяния 0°С.

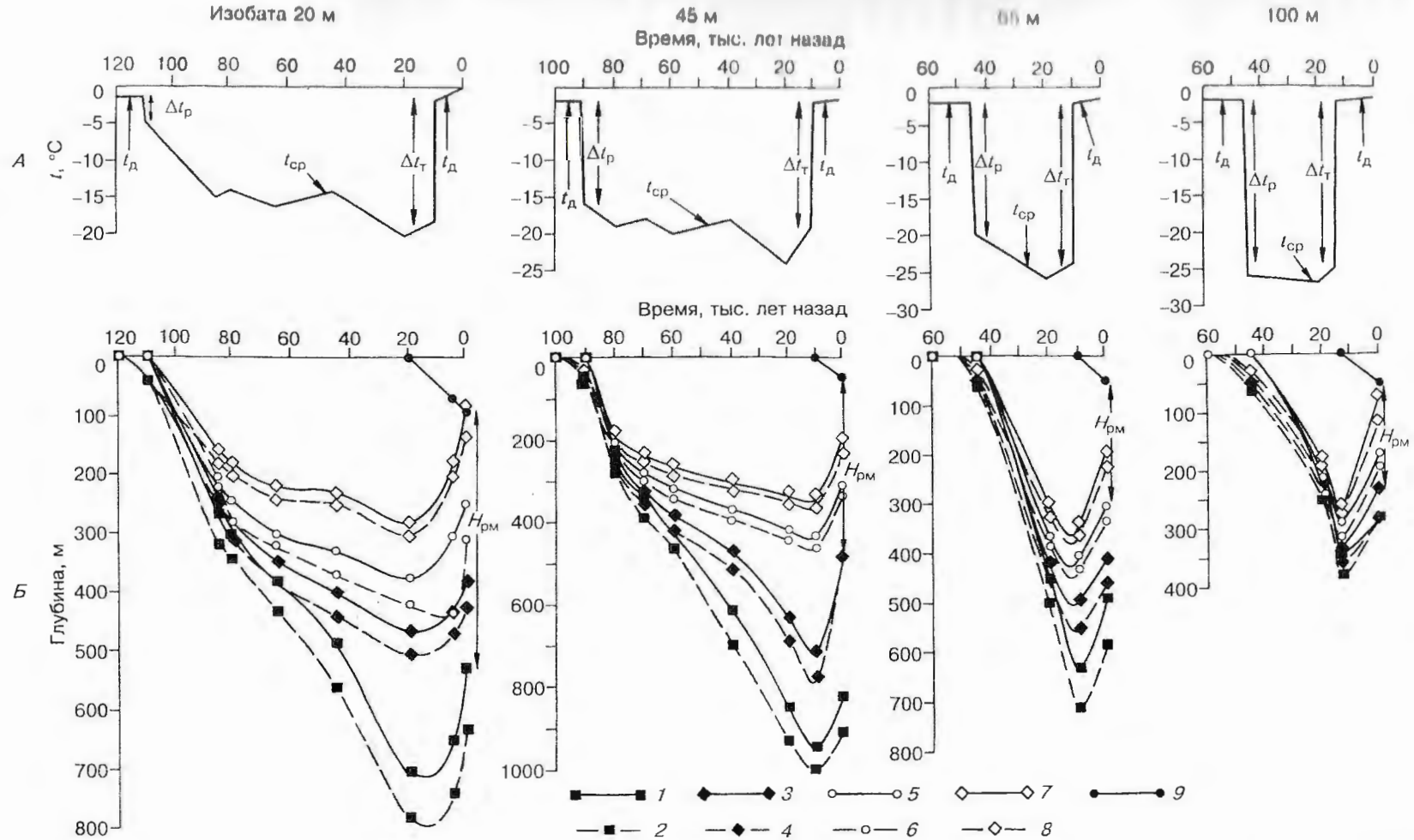


Рис. 5. Изменение во времени температуры поверхности шельфа (А) и положения нижней и верхней границ мерзлой толщи и изотермы 0°C (Б) для разных глубин. Положение нижней границы мерзлой толщи (сплошная линия) и геоизотермы 0°C (прерывистая линия) для различных значений плотности теплового потока:

1 и 2 — 30 мВт/м^2 ; 3 и 4 — 40 мВт/м^2 ; 5 и 6 — 60 мВт/м^2 ; 7 и 8 — 80 мВт/м^2 ; 9 — верхняя граница мерзлой толщи; Δt_p — скачок температуры поверхности шельфа при регрессии; Δt_t — скачок температуры поверхности шельфа при трансгрессии; t_d — температура дна моря; t_{cp} — температура поверхности шельфа в субэдральный этап; $H_{рм}$ — мощность реликтового слоя мерзлых пород.

Наличие на Лаптевском шельфе активно погружающихся в течение всего кайнозоя рифтовых грабенов позволяет предполагать накопление в их пределах достаточно мощной толщи субаэральных отложений ледового комплекса. Представляется, что они сохранили свое мерзлое состояние вследствие охлаждающего воздействия отрицательно-температурной морской воды, и что этим опускающимся структурам свойственна повышенная мощность ММП. Напротив, на поднятиях, как показывают криолитологические данные по Новосибирским о-вам, разрез плейстоценовых отложений неполный, мощности их сокращены, включая и позднеплейстоценовый „ледовый комплекс“. Не исключается также, исходя из геотермических данных В.А. Соловьева [Гинсбург, 1982] и сокращение мощности мерзлых толщ в пределах положительных структур.

Другой аспект геоструктурного контроля геокриологических условий связан с мощностью геотермических потоков в зонах крупных сейсмоактивных разломов. С их влиянием связывается возможность формирования линейных сквозных субмаринных таликов.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты, учитывающие мерзлотно-температурную зональность, проведенные для глубины моря -20 м, дали следующие результаты.

Участки шельфа, испытывающие опускания, характеризуются изменением положения нижней границы мерзлой толщи в пределах блоков от $340-410$ м на широте 71° до $520-590$ м и $700-740$ м на широтах 74° и 77° , соответственно (табл. 2). В зонах активных разломов на широте 71° прогнозируются сквозные

Таблица 2. Современное положение нижней границы ММП (глубина от поверхности шельфа, м) на разных широтах при различных величинах геотермического потока для отрицательных и положительных тектонических структур, при глубине моря 20 м

Элементы структур	Геотермический поток, мВт/м ²	Градусы, с.ш.		
		71	74	77
<i>Отрицательные тектонические структуры</i>				
Блоки	40	410	590	740
	50	340	520	700
Разломы	100	0	190	280
<i>Положительные тектонические структуры</i>				
Блоки	40	320	520	680
	50	280	350	480
Разломы	100	140	260	370

талики, а на широтах 74° и 77° — ММП мощностью 190 и 280 м, соответственно.

На поднятиях мощность ММП на широте 71° достигает $280-320$ м в стабильных зонах и 140 м в пределах крупных сеймогенерирующих разломов. На широтах 74° и 77° она соответственно увеличивается (табл. 2).

Рассмотренные выше материалы дали возможность составить прогнозную карту распространения мерзлых толщ на шельфе моря Лаптевых (рис. 6).

ВЫВОДЫ

Основные геокриологические особенности шельфа моря Лаптевых представляются следующими.

1. Практически сплошное распространение реликтового слоя ММП свойственно акватории до изобат -60 — -70 м. На больших глубинах вплоть до внешней бровки шельфа (местами — верхней части континентального склона) характерно, скорее всего, прерывистое развитие ММП. Прогнозируется существование сквозных линейно вытянутых таликов в зонах крупных и сеймогенерирующих разломов рифтовых структур с высокими величинами теплоточков (от 100 мВт/м² и более). Особое место занимает мерзлота дельт рек и русловой части палеодолин крупных рек, где помимо несквозных, видимо, существуют сквозные талики.

2. В прибрежной зоне, распространяющейся до изобат -15 — -20 м, существуют глубокие несквозные талики. Массивы мерзлых пород, кровля которых практически совпадает с морским дном, существуют здесь на месте недавно размытых островов, слагавшихся „ледовым комплексом“, и вдоль отступающих под натиском термоабразии берегов.

3. Наибольшие мощности реликтового слоя ММП ($280-740$ м) прогнозируются в высоких широтах (севернее о-ва Котельного) в полосе изобат -10 ; -45 м, где промерзание было наиболее длительным и происходило в очень суровой обстановке. Деграция мерзлоты началась и происходит здесь под морем, постоянно имеющем низкие отрицательные температуры ($-1,5$ — -2°C). Еще большее увеличение глубин промерзания пород можно ожидать в пределах консолидированных блоков литосферы с невысокими теплоточками ($30-40$ мВт/м²) в восточной части моря Лаптевых.

4. Кровля реликтового слоя ММП неровная. Предполагается, что наименьшая мощность неконсолидированных охлажденных (оттаявших) отложений над многолетнемерзлыми породами характерна для участков, сложенных с поверхности сильнольдистыми синкриогенными породами.

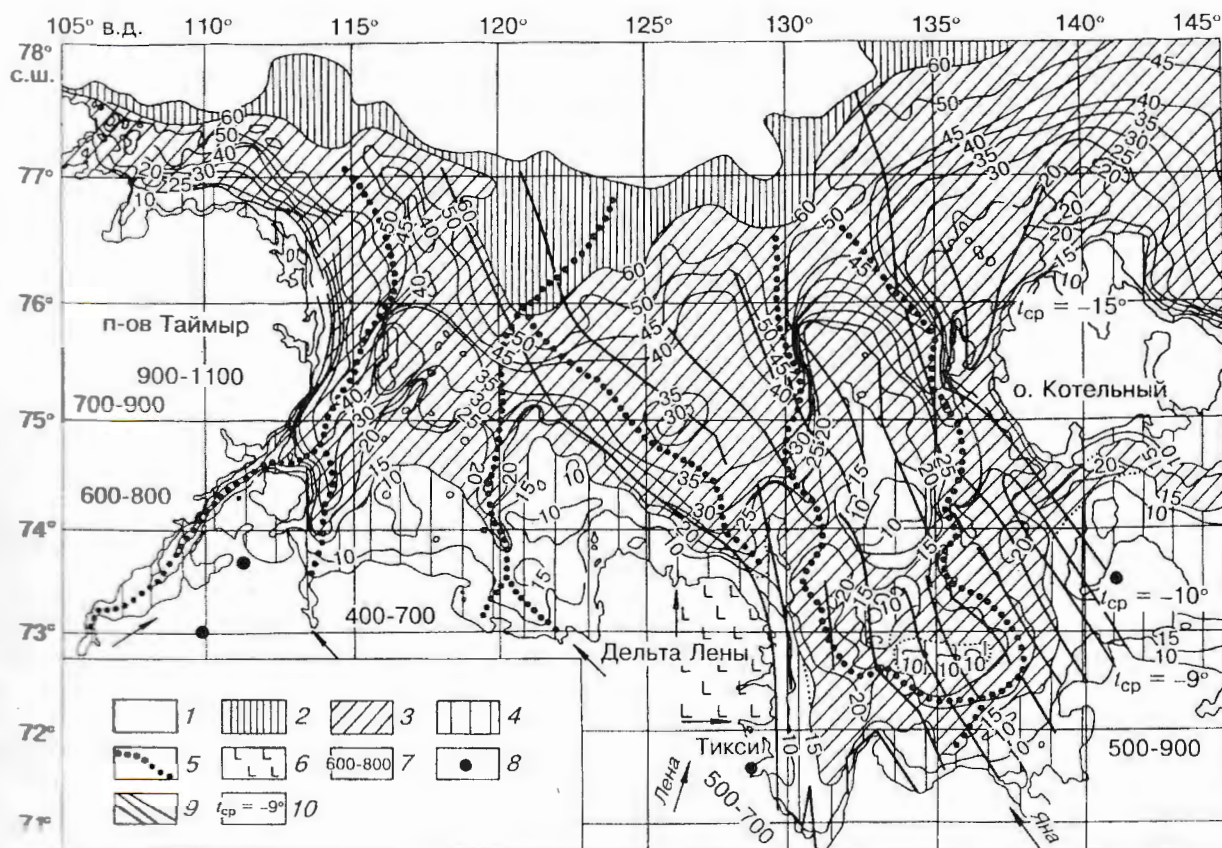


Рис. 6. Прогнозная карта распространения мерзлых толщ и охлажденных пород на шельфе моря Лаптевых.

1 — зона охлажденных пород, 2 — зона прерывистого распространения реликтовых ММП, 3 — зона сплошного распространения реликтовых ММП, перекрытого неравномерным слоем охлажденных осадков, 4 — зона сплошного распространения реликтовых ММП с подводными несквозными таликами, 5 — несквозные талики, приуроченные к затопленным палеодолинам рек, 6 — современная „мерзлота речных дельт“, 7 — мощность многолетнемерзлых пород в прилегающих областях побережья, м, 8 — глубокие скважины, в которых измерены значения тепловых потоков, 9 — талики, приуроченные к активным разломам, 10 — среднегодовые температуры грунтов на соответствующих широтах, °С.

В заключение необходимо отметить, что изложенные материалы являются самыми первыми предварительными результатами русско-германских исследований криолитозоны моря Лаптевых. Планируемое дальнейшее изучение четвертичной истории региона, исследование температур донных отложений и интерпретация результатов геофизических работ будут использоваться для уточнения предложенных палеогеографической и математической моделей эволюции криолитозоны Лаптевского шельфа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа была сделана в рамках русско-германского научного сотрудничества и поддержана Институтом им. Альфреда Вегенера (Бремерхаузен и Потсдам) и ГЕОМАР (Киль). Авторы благодарны Германскому Министерству Науки и

Технологии (B & BF Grant # 5254003 OG0517A) и Российскому фонду фундаментальных исследований (грант 97-05-64206), которые поддерживали это исследование. Авторы пользуются случаем и приносят искреннюю благодарность Л.Н.Хрусталеву за возможность использования программы „Тепло“, О.М.Лисициной и И.А.Комарову за помощь в выборе данных по теплофизическим свойствам засоленных отложений.

Литература

- Арз Ф.Э. Термоабразия морских берегов. М., Наука, 1980. 160 с.
 Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы Севера Азии // Новосибирск, Наука, 1991, 193 с.
 Баранов И.Я. Геокриологическая карта СССР. Масштаб 1:5 000 000. М., 1964.
 Веселов О.В., Липина Е.Н. Каталог данных о тепловом потоке востока Азии, Австралии и запада Тихого океана. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1982, 121 с.

- Геокриологическая карта СССР, м-б 1:2 500 000/Ред. Е.Д. Ершов. М., Изд-во МГУ, 1997.
- Жигарев Л.А. Инженерно-геологическая характеристика шельфа юго-восточной части моря Лаптевых // Исследования прибрежных равнин и шельфа арктических морей. М., Изд-во МГУ, 1979, с. 91—96.
- Общее мерзлотоведение (геокриология) / Под ред. Кудрявцева В.А. М., Изд-во МГУ, 1978, 464 с.
- Неизвестнов Я.В. Мерзлотно-гидрогеологические условия зоны арктического шельфа СССР // Криолитозона Арктического шельфа. Якутск, 1981, с. 18—27.
- Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM. Св-во № 940281 РосАПО, 12.07.1994 (Российское агентство по правовой охране программ для ЭВМ, баз данных и технологий интегральных микросхем).
- Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Холодов А.Л. и др. Реконструкция палеогеографических условий шельфа моря Лаптевых для позднелайстоцен-голоценового гляциоэвстатического цикла // Криосфера Земли, 1997, т.1, № 2, с. 42—49.
- Соловьев И.А., Телепнев Е.В. Криолитозона Северного Ледовитого Океана // Криогеотермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого Океана. Л., 1987, с. 110—131.
- Телепнев Е.В. Субаквальная мерзлая зона прибрежной части острова Большой Ляховский // Криолитозона Арктического шельфа. Якутск, Изд-во ИМ СО АН СССР, 1981, с. 44—52.
- Фартышев А.И. Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых // Новосибирск, Наука, 1993. 136 с.
- Chapell J., Omura A., McCulloch M., et al. Reconciliation of late Quaternary sea level derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records. Elsevier, 1996. p. 227—236.
- Churin V.N., Timochov L.A. Cold Bottom Water in the Southern Laptev Sea. Reports on Polar Research. 176/1995, p. 107—114.
- Dehn J., Kassens H. and TRANSDRIFT // Shipboard Scientific Party // The Sedimentary Environment of the Laptev Sea: Preliminary Results of the TRANSDRIFT II Expedition // Reports on Polar Research. 176/1995, p. 314—323.
- Dethleff D. Dynamics of the Laptev Sea flaw lead // Reports on Polar Research. 144/1994, p. 49—55.
- Dmitrenko I.A. et al., TRANSDRIFT // Shipboard Scientific Party // The Distribution of River Run-off in the Laptev Sea: The Environmental Effect // Reports on Polar Research. 176/1995, p. 114—121.
- Drachev S.S., Savostin L.A., Bruni J.E. Structural Pattern and Tectonic History of the Laptev Sea Region // Reports on Polar Research. 176/1995, p. 348—367.
- Fairbanks R.J. A 17.000 — year glacio-eustatic sea level record: Influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep ocean circulation // Nature, 1989, vol. 342, p. 637—642.
- Reports on Polar Research. 151/1994, p. 168.

Поступила в редакцию
16 июня 1997 г.