

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.328/345

ОСОБЕННОСТИ КРИОДИАГЕНЕЗА МОРСКИХ ОСАДКОВ  
АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

А.Д. Маслов

*Ухтинский государственный технический университет,  
169300, Ухта, ул. Первомайская, 13, Россия, mpikova@ugtu.net*

Проведены комплексные геокриологические и инженерно-геологические исследования на территории Большеземельской тундры, полуострова Ямал, арктического шельфа Карского и Баренцева морей: бурение скважин на всю мощность криолитозоны с отбором керна, термометрические наблюдения в скважинах, лабораторные определения физических, механических, химических и теплофизических свойств грунтов. Доказано, что криосинерезис является ведущим процессом, формирующим и контролирующим субмаринный тип криодиагенеза осадков.

*Криолитозона, температура начала замерзания, температурный запас устойчивости, физические состояния пород: мерзлое, охлажденное, талое*

MARINE SEDIMENT CRYODIAGENESIS FEATURES OF THE ARCTIC SHELF

A.D. Maslov

*Ukhta State Technical University,  
169300, Ukhta, Pervomaiskaya str., 13, Russia, mpikova@ugtu.net*

Complex geocryological and engineering-geological researches (deep drilling of cryolithozone with core extraction, thermometric observations in wells, laboratory dating of physical, mechanical, chemical and thermophysical characteristics of soils) have been carried out on the territory of the Bolshezemelskaya tundra, Yamal peninsula, arctic shelf of the Kara and Barents seas. It has been proved that cryosineresis is the leading process that forms and controls the submarine type of sediment cryodiagenesis.

*Cryolithozone, initial temperature of freezing, temperature stability factor, physical states of rock: frozen, cooled and melt*

ВВЕДЕНИЕ

Идея субмаринного типа криодиагенеза принадлежит А.И. Попову [1981]. Выявив взаимосвязь дислокационных структур в современных субаэральных условиях с морским подводным оползнеобразованием, он прозорливо предположил, что в пределах арктического шельфа литогенез имеет свои специфические черты. На наш взгляд, высказанная А.И. Поповым гипотеза является крупным научным событием-предтечей.

Проведение морских геокриологических исследований резко активизировалось в 1980-е гг. в связи с началом освоения нефтегазоносных структур арктического шельфа. В 1980 г. Мингазпромом было создано предприятие АМИГЭ, которому было поручено проведение изыскательских работ на шельфе Баренцева и Карского морей.

Этот период явился поворотным как в общем теоретическом плане, так и в направлении получе-

ния значительной научной и практической информации. Некоторые результаты исследований уже опубликованы [Маслов, 1985, 1988, 1992], значительная часть материалов представлена в работах В.П. Мельникова и В.И. Спесивцева [1995, 2000].

Приводимый в настоящей статье материал носит поисковый характер и не представляется исчерпывающим для окончательных выводов, он дискуссионен. Поскольку актуальность темы не вызывает сомнений, думается, что наступило время обобщить имеющийся материал и дополнить его новыми данными.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**1. Роль синерезиса на стадии диагенеза морских осадков.** Морские осадки рассматриваются в качестве дисперсных систем, в которых органическая часть является твердой фазой, а поровые

растворы – дисперсной средой. Значительную роль в формировании и преобразовании таких природных систем в процессе литогенеза играет синерезис.

Вопросы синерезиса подробно рассмотрены в работах И.М. Горьковой [1975] и В.Н. Соколова, В.И. Осипова [1985]. Нет необходимости сейчас детально излагать их взгляды, так как ранее нами был дан такой анализ [Маслов, 1992]. Здесь, суммируя общие результаты, отметим следующее.

Синерезис, как один из ведущих процессов литогенеза морских осадков, представляет собой постепенное самоуплотнение пространственной структуры за счет “старения” дисперсной системы или под тяжестью вышележащих осадков; сопровождается механическим вытеснением воды и увеличением жесткости осадка [Геологический словарь, 1973].

Следовательно, синерезис понимается нами как специфический процесс формирования осадков на стадии диагенеза, протекающий в интервале значений естественных положительных температур.

**2. Экспериментальные исследования.** Как уже отмечалось, охлажденные породы имеют преимущество распространение на шельфе Баренцева и Карского морей. Так, на Ново-Земельской структуре (отработанная площадь около 3 тыс. км<sup>2</sup> по сети 8 × 8 км, при глубинах моря от 65 до 145 м) было сделано 60 станций пробоботбора. Результаты оказались следующие: на 54 станциях значения естественной температуры ( $t_e$ ) колеблются от  $-0,1$  до  $-2,0$  °С, средние значения (около 85 %) – от  $-0,8$  до  $-1,3$  °С, на четырех станциях зафиксирована температура 0 °С и лишь на двух – положительная (0,2 и 0,5 °С).

Именно широкое развитие на арктическом шельфе охлажденных пород и предопределило проведение специальных исследований: компрессионные испытания грунтов при  $t_e > 0$  °С в талом режиме и в диапазоне температур от нуля до температуры начала замерзания ( $t_3$ ) – в охлажденном. Исследования проводились по специально разработанным нами программам, методики которых изложены в предыдущих работах [Маслов, 1985, 1986, 1988, 1992]. Первые же испытания (Ново-Земельская структура, глубина моря 141 м, глубина отбора 1,8–2,0 м ниже дна, образцы-близнецы глины ненарушенного сложения,  $t_e = -1,3$  °С,  $t_3 = -1,8$  °С) при температурах 21 и  $-0,1$  °С показали, что сжимаемость глины в охлажденном состоянии меньше, чем ее сжимаемость при положительной температуре. Время стабилизации осадки на каждой ступени давления также неодинаково. Испытания охлажденного образца (по шести ступеням загрузки) закончились на 172 ч позже, чем талого. Под действием нагрузки выдавливание поровой воды из охлажденной глины (по данным определения коэффициента фильтрации по кинетике консолидации

этих образцов) идет значительно медленнее, т. е. понижение температуры в образце до охлажденного состояния уменьшает сжимаемость и увеличивает время стабилизации осадки грунта за счет снижения в нем гидравлической проводимости. Тогда же было высказано предположение [Маслов, 1985], что с понижением температуры грунта увеличивается вязкость содержащейся в нем воды, причем вязкость у различных категорий влаги, присутствующих в грунтах, вероятно, неодинаковая. Это и предопределяет сам процесс отжатия влаги из грунта. Таким образом, морские охлажденные осадки современной субаквальной криолитозоны по комплексу своих деформационно-прочностных свойств составляют особую категорию грунтов, отличающуюся как от талых, так и от мерзлых грунтов.

В новой серии экспериментов (175 испытаний, сублитораль Карского моря, изобаты 90–130 м, голоценовые отложения,  $t_e$  от  $-1,2$  до  $-1,8$  °С и изобаты 7–15 м, плейстоценовые отложения при  $t_e$  около  $-1,0$  °С) получены данные, подтверждающие правильность первых результатов [Маслов, 1988]. Вывод о том, что охлажденные породы составляют особую категорию грунтов, распространяется и на уплотненные дисперсные породы более древнего возраста. Были проведены комплексные испытания образцов глин и суглинков ненарушенного сложения (современная субаэральная криолитозона Большеземельской тундры – Коровинская гряда, глубина отбора от 108 до 156 м, абсолютная отметка устья скважины 96 м, испытано 25 образцов, грунты относятся к морским среднеплейстоценовым отложениям роговской свиты). Испытания проводились на образцах-близнецах в талом (при 20 °С) и охлажденном ( $-1$  °С) режимах, значения  $t_3$  варьировали от  $-1,4$  до  $-2,7$  °С. Результаты показали, что сжимаемость охлажденных грунтов на 30–40 % меньше сжимаемости талых, вытеснение порового раствора из охлажденных образцов происходит менее интенсивно, под действием уплотняющих нагрузок у талых грунтов наибольшие значения осадок возникают на начальных (первых трех) ступенях загрузки, у охлажденных – на последующих [Маслов, 1992].

**3. Криосинерезис.** Итак, очевидно, что активность синерезиса находится в прямой зависимости от температуры, при которой происходит этот процесс. С понижением температуры при прочих равных условиях величина осадки грунтов (сжимаемость) уменьшается, а время стабилизации на каждой ступени загрузки увеличивается.

Первые же результаты компрессионных испытаний [Маслов, 1985] позволили высказать предположение, что с понижением температуры грунта увеличивается вязкость содержащегося в нем порового раствора, причем она неодинаковая у различных категорий влаги. Это и предопределяет

специфику отжатия поровой воды. Дальнейшие исследования [Маслов, 1988, 1992] показали, что само уплотнение грунта в охлажденном режиме испытаний непосредственно зависит от характера процесса отжатия из него поровой влаги (от его избирательной направленности, в результате которой происходит четкая дифференциация жидкой фазы). А именно, остаточный в грунте поровый раствор становится более концентрированным, чем исходный (до опыта), а выжатый – всегда менее концентрированным (чем исходный и остаточный). Следовательно, при диагенезе морских осадков в охлажденном состоянии происходит “засоление” остаточного и “опреснение” выжатого растворов. В талом режиме испытаний подобная зависимость отсутствует. Таким образом, предварительно можно обозначить температуру ( $t_e = 0^\circ\text{C}$ ), выше и ниже которой консолидация морского осадка протекает неодинаково: существуют явные различия во времени стабилизации нагрузок, величине и скорости относительных осадок, характере перераспределения поровых растворов. Поскольку при  $t_e < 0^\circ\text{C}$  грунты могут находиться в разных физических состояниях, нами были проведены специальные исследования компрессионных свойств одних и тех же грунтов в талом, охлажденном и мерзлом режимах загрузки (на пастах воркутинских суглинков).

Полученные результаты также позволяют однозначно констатировать, что уплотнение грунтов в охлажденном режиме испытаний резко отличается от характера консолидации этих же грунтов (паст), исследованных в талом и мерзлом режимах. Следует учитывать, что компрессионные испытания грунтов в талом и охлажденном режимах загрузки, хотя и с определенными допусками, но фактически моделируют синерезис (искусственный синерезис, сокращенный во времени). Поскольку процесс синерезиса в интервале от  $0^\circ\text{C}$  до  $t_3$  весьма специфичен по характеру консолидации осадков, в количественном и качественном отношении контрастирует с обычным синерезисом (при  $t_e > 0^\circ\text{C}$ ), его воздействие на грунты необходимо рассматривать отдельно. Этот процесс обозначен термином “криосинерезис” [Маслов, 1985].

В свое время мы высказывались о механизме криосинерезиса, правда, в предположительной форме [Маслов, 1985, 1988, 1992]. Этот механизм подтверждается экспериментальными исследованиями А.А. Ананяна [1980]. Им доказано, что с понижением температуры дисперсной породы вязкость в тонких пленках незамерзшей воды ( $W_n$ ) возрастает (при  $-1...-2^\circ\text{C}$  вязкость  $W_n$  в 5–6 раз выше вязкости  $W_n$  при комнатной температуре). Причем он однозначно выделяет конкретный интервал температур (от  $0^\circ\text{C}$  до  $t_3$ ), в котором дисперсные системы по характеру молекулярных связей и степени вязкости поровой воды резко отличаются от таковых при температуре выше  $0^\circ\text{C}$  и

ниже  $t_3$ . Фактически, А.А. Ананян, изучая соотношение далеко- и короткодействующих ион-дипольных сил в водных пленках в зависимости от изменения температуры, опосредованно выделил спектр температур (от  $0^\circ\text{C}$  до  $t_3$ ), четко соответствующий охлажденному типу грунтов.

Итак, криосинерезис – объективно существующий процесс, участвующий в консолидации охлажденных морских осадков. Нами выделено два типа криосинерезиса.

*Собственно криосинерезис (пассивный)*, доминирующий на арктическом шельфе (вероятно, и на антарктическом), – процесс формирования и преобразования морских осадков в диапазоне естественных температур от  $0^\circ\text{C}$  до  $t_3$ . При этом происходит механическое упрочнение за счет самоуплотнения пространственной структуры (на начальной стадии старения осадка) или под тяжестью вышележащих слоев (на последующей стадии гравитационного уплотнения). Процесс сопровождается уменьшением объема и вытеснением поровой влаги, но в отличие от синерезиса (при  $t_e > 0^\circ\text{C}$ ) специфику консолидации охлажденных осадков характеризуют меньшая сжимаемость при большем времени стабилизации уплотнения, увеличение концентрации остаточного порового раствора (засоление) и опреснение выжимаемого.

*Активный криосинерезис* – процесс преобразования морских охлажденных осадков (проходящих или прошедших этап пассивного криосинерезиса), регулируемый подводным оползнеобразованием. Активный синерезис развивается под действием напорных гидроградиентов, возникающих в теле оползня за счет дислокационного смятия и неравномерного перемещения слоев вниз по склону. Он сопровождается дифференцированным перераспределением порового раствора внутри слоев, в некоторых случаях (при оптимальном соотношении значений  $t_e$  и  $t_3$ ) сопровождается и качественным изменением физического состояния донных отложений: переход из охлажденного в мерзлое без изменения естественного температурного режима.

### СУБМАРИННЫЙ (СУБАКВАЛЬНЫЙ) КРИОДИАГЕНЕЗ

Нами выделено пять подтипов субмаринного криодиagenеза.

**1. Седиментационный криодиagenез.** Как известно, разность значений  $t_e$  и  $t_3$  характеризует величину температурного запаса устойчивости физического состояния породы ( $\Delta t$ ) [Маслов, 1985, 2006]. При  $\Delta t > 0^\circ\text{C}$  состояние охлажденное, при  $\Delta t < 0^\circ\text{C}$  – мерзлое, при  $\Delta t = t_e - t_3 = 0^\circ\text{C}$  неустойчивое равновесное состояние (нулевой барьер модификационного перехода).

Седиментационный криодиagenез морских осадков происходит в процессе (и после) осадко-

накопления при непосредственном участии собственно криосинерезиса (пассивного). Это наиболее распространенный вид криодиагенеза на арктическом шельфе [Маслов, 1988, 1992]. Данный процесс специфичен из-за дифференцированного перераспределения порового раствора в консолидируемых охлажденных грунтах. В результате охлажденное физическое состояние донных осадков становится более устойчивым (модуль величины  $\Delta t$  растет). Эффективность процессов, сопутствующих седиментационному криодиагенезу, проявляется по-разному, так как зависит от многих факторов. Например установлено, что голоценовые осадки менее консолидированы, чем плейстоценовые (что не требует пояснения). В то же время экспериментальные исследования охлажденных грунтов однозначно указывают на то, что значения осадков в голоценовых глинах и суглинках сублиторали Карского моря более высокие, чем в грунтах сублиторали Баренцева моря (при близости значений влажности и грансостава). Скорее всего, основными причинами этого являются естественная температура грунта ( $t_c$  сублиторали Карского моря ниже) и скорость осадконакопления.

Ранее было доказано [Маслов, 2005], что при седиментационном криодиагенезе переход морских отложений из охлажденного состояния в мерзлое в придонном слое сублиторали практически исключен, так как сам механизм пассивного криосинерезиса препятствует льдообразованию. В то же время самопромерзание донных отложений сублиторали возможно, но не за счет седиментационного криодиагенеза. Так, мерзлые отложения могут формироваться и существовать (сезонно или несколько лет) на ограниченных участках сублиторали, соответствующих локальным понижениям (впадинам), где отсутствуют подводные течения и литодинамические процессы. В этом случае промерзание осадков будет обязано конвективному (вертикальному) переносу водных масс. Льдообразование в придонном слое осадков возможно также и при резком изменении температурного режима подводных течений, когда  $t_c$  морской воды будет ниже  $t_z$  порового раствора осадков.

**2. Пликативно-дислокационный криодиагенез (криптокриодиагенез).** Криптокриодиагенез происходит на участках подводного оползнеобразования при непосредственном участии активного криосинерезиса, наложенного на седиментационный криодиагенез морских осадков. От того, в каком качестве будет “работать” тот или иной деформируемый слой в оползне (во-первых, в качестве слоя-накопителя, вмещающего, “впитывающего” в себя дополнительную поровую влагу; во-вторых, транзитного слоя, пропускающего, “процеживающего” раствор через себя; в-третьих, слоя-поставщика, “слоя-донора”, отдающего излишки поровой воды), зависит и конечное физическое состояние каждого

слоя. В любом случае, оно будет определяться и контролироваться исходным состоянием дисперсной системы, сформировавшейся на стадии седиментационного криодиагенеза (к моменту начала оползнеобразования), и характером оползнеобразования (типом оползня, скоростью, объемом смещающейся массы). Криптокриодиагенез предопределяет на завершающем этапе одновременное соседство морских отложений в охлажденном, мерзлом и неустойчивом равновесном состояниях (“криорулет”), парагенетически связанных между собой единым процессом активного криосинерезиса. Так, в некоторых пликативных складках и дислокационных разрывах происходит трансформация физического состояния пород (качественные изменения): при неизменной отрицательной естественной температуре повышаются (преимущественно в слоях-накопителях) значения температуры начала замерзания, в результате чего здесь происходит смена знака величины  $\Delta t$  с положительного на отрицательный. Одновременно в других слоях (преимущественно в слоях-донорах) значения  $t_z$  понижаются, величина  $\Delta t$  соответственно растет (по сравнению с изначальной) и осадки переходят в более устойчивое охлажденное состояние. Отдельные слои (транзитные и слои-накопители) за счет повышения  $t_z$  будут приближаться к неустойчивому охлажденному состоянию. В термин “криодиагенез” добавлено слово “крипто” (греч. – скрытый, тайный), так как, с одной стороны, переход осадков из охлажденного состояния в мерзлое носит скрытый характер: при  $t_c = \text{const}$  значение  $t_z$  стремится к  $0^\circ\text{C}$ , с другой – параллельно идет также скрытый процесс криодиагенеза: дифференциация охлажденных осадков по степени их устойчивости (в одних слоях величина  $\Delta t$  по модулю растет, в других – уменьшается).

На рис. 1 приведен фрагмент схемы размещения скважин в районе исследований АМИГЭ (Харасавэй: суша–море). Данные режимных термометрических наблюдений в скважинах и экспериментальных исследований на образцах-монолитах (вместе с визуальными) позволили определить физическое состояние пород и характеристики величины  $\Delta t$ . Эти результаты отражены на рис. 2. На рис. 3 представлен геокриологический разрез по линии I–I (см. рис. 1), из которого видно, что в зоне сублиторали (изобаты 10–12 м) в 3,5–6,0 км западнее береговой линии залегают два мерзлых останца. Какова природа их возникновения? Комплекс необходимых анализов однозначно указывает на морской генезис этих отложений. Рассмотрим такой вариант: отложения сформировались в субаквальных условиях, промерзли в субаэральных и вновь, пройдя литораль, оказались в сублиторальной зоне, перейдя большей частью в охлажденное состояние, сохранив мерзлое лишь в виде реликта (двух останцов).

В нашем случае особо необходимо отметить следующее. Отложения литорали имеют относительно низкие значения температур:  $t_e$  от  $-2,5$  до  $-4,5$  °C и  $t_3$  от  $-1,5$  до  $-3,0$  °C. При таком соотношении температур здесь может соблюдаться условие  $t_e < t_3$ , т. е. мерзлое состояние. В то же время температура отложений сублиторали характеризуется более высокими значениями:  $t_e$  от  $-0,8$  до  $-1,0$  °C и  $t_3$  от  $-1,2$  до  $-2,1$  °C. Совершенно очевидно, что переход осадков мелководья в сублиторальный режим, когда действует условие  $t_3 = \text{const}$ , а  $t_e$  повышается до  $-1,0$  °C, приведет к тому, что все изначально мерзлые осадки литорали перейдут в охлажденное состояние в сублиторальной зоне, так как здесь возникает совершенно иная ситуация:  $t_e$  сублиторали во всех случаях будет выше  $t_3$  литоральных отложений, поэтому величина  $\Delta t$  сменит знак с отрицательного на положительный. Следовательно, остается единственное объяснение: донные отложения морского генезиса приобрели мерзлое состояние в сублиторальной зоне (*in situ*). Иными словами, мерзлые криогенные толщи являются результатом криптокриодиагенеза. В этом случае необходимо отказаться от расхожего термина “реликт” (остаток далекого прошлого), так как дифференциация морских отложений на охлажденные и мерзлые происходила здесь на более позднем этапе – в период активного криосинерезиса. Считать их реликтовыми по отношению к соседним охлажденным породам, также вовлеченным в активную сферу оползнеобразования, в корне неверно.

Анализ имеющегося материала позволяет выявить определенный набор таких признаков, подтверждающих сам факт наличия на участке развития мерзлых пород подводного оползня или следов его деятельности. Общие морфологические черты (внешние контуры) предполагаемого оползневого тела (см. рис. 3) явно прослеживаются в левой части разреза по неровной поверхности его кровли, перекрытой песчаными осадками, и по четкому боковому контакту, соответствующему литолого-генетической смене отложений. Правее располагается заполненная песчаными осадками ложбина, вложенная в более ранние образования и имеющая явный уклон днища в сторону моря. Данную ложбину можно идентифицировать с бывшим участком сноса отсюда супесчано-суглинистого материала. В этом случае подошва песчаной пачки определяет нижнюю границу поверхности зоны скольжения подводного оползня.

Важной особенностью криогенного строения рассматриваемого разреза является наличие в его левой части двух останцев мерзлых толщ (кровля на глубине 8–10 м ниже морского дна), разделенных охлажденными породами. Учитывая все ранее изложенное, только с позиции пликвативно-дислокационного криодиагенеза можно объяснить наличие в сублиторали мерзлых отложений.

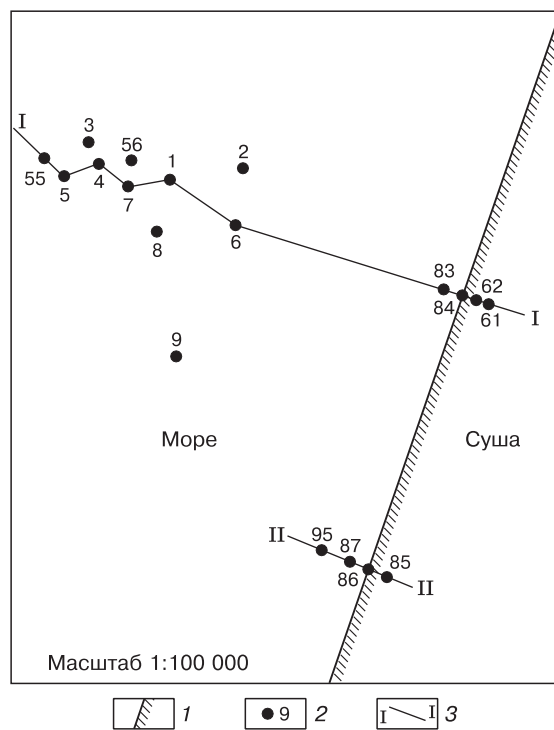


Рис. 1. Схема размещения скважин (фрагмент):

1 – береговая линия; 2 – местоположение скважины и ее номер; 3 – линии геокриологических разрезов.

И наконец, на процесс криптокриогенеза указывает сам характер распределения значений параметров, определяющих физические состояния пород. В исследуемой зоне сублиторали общий фон температурного режима пород определяется узким спектром значений  $t_e$  – от  $-0,8$  до  $-1,0$  °C, строго выдержанных по глубине и простиранию. В то же время  $t_3$  поровых растворов лежит (здесь же) в широком диапазоне значений – от  $-0,2$  до  $-2,2$  °C, причем их распределение строго дифференцировано по физическому состоянию – от  $-0,20$  до  $-0,65$  °C для мерзлого и от  $-1,2$  до  $-2,2$  °C для охлажденного (см. рис. 2). Естественно, что при седиментационном криодиагенезе, когда практически невозможен переход осадков в мерзлое состояние, подобного распределения значений  $t_3$  быть не может (эта характеристика контролируется процессом пассивного криосинерезиса). Такое варьирование значений  $t_3$  на относительно небольшой площади невозможно. Поэтому совершенно очевидно, что рассматриваемые отложения сублиторали претерпели вторичный криодиагенез, а именно – криптокриодиагенез, в результате чего часть отложений перешла в мерзлое состояние. Кстати, мы столкнулись здесь с особым типом физического состояния: охлажденные породы (лед-цемент полностью отсутствует) вмещают редкие ледяные шпирь и про-

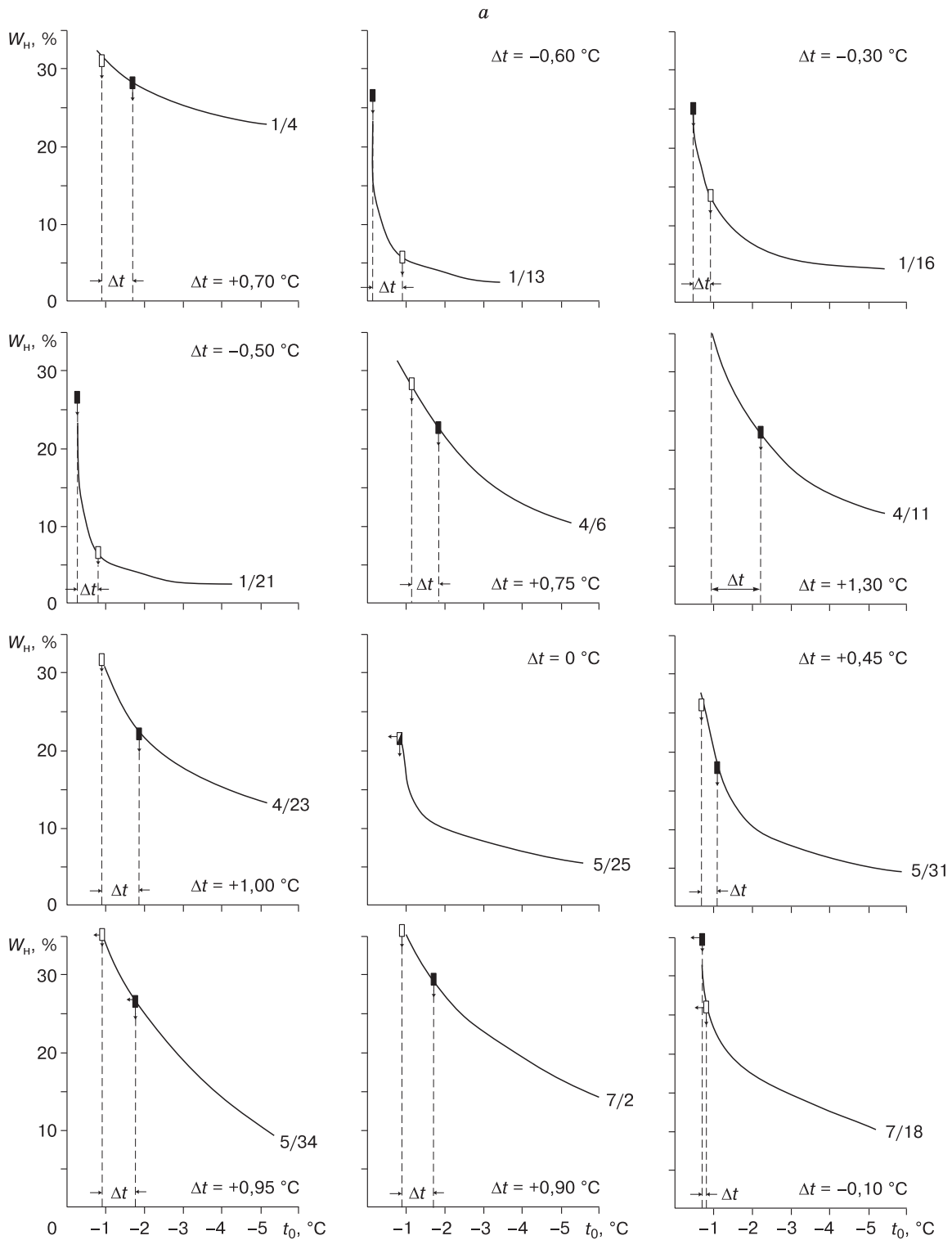
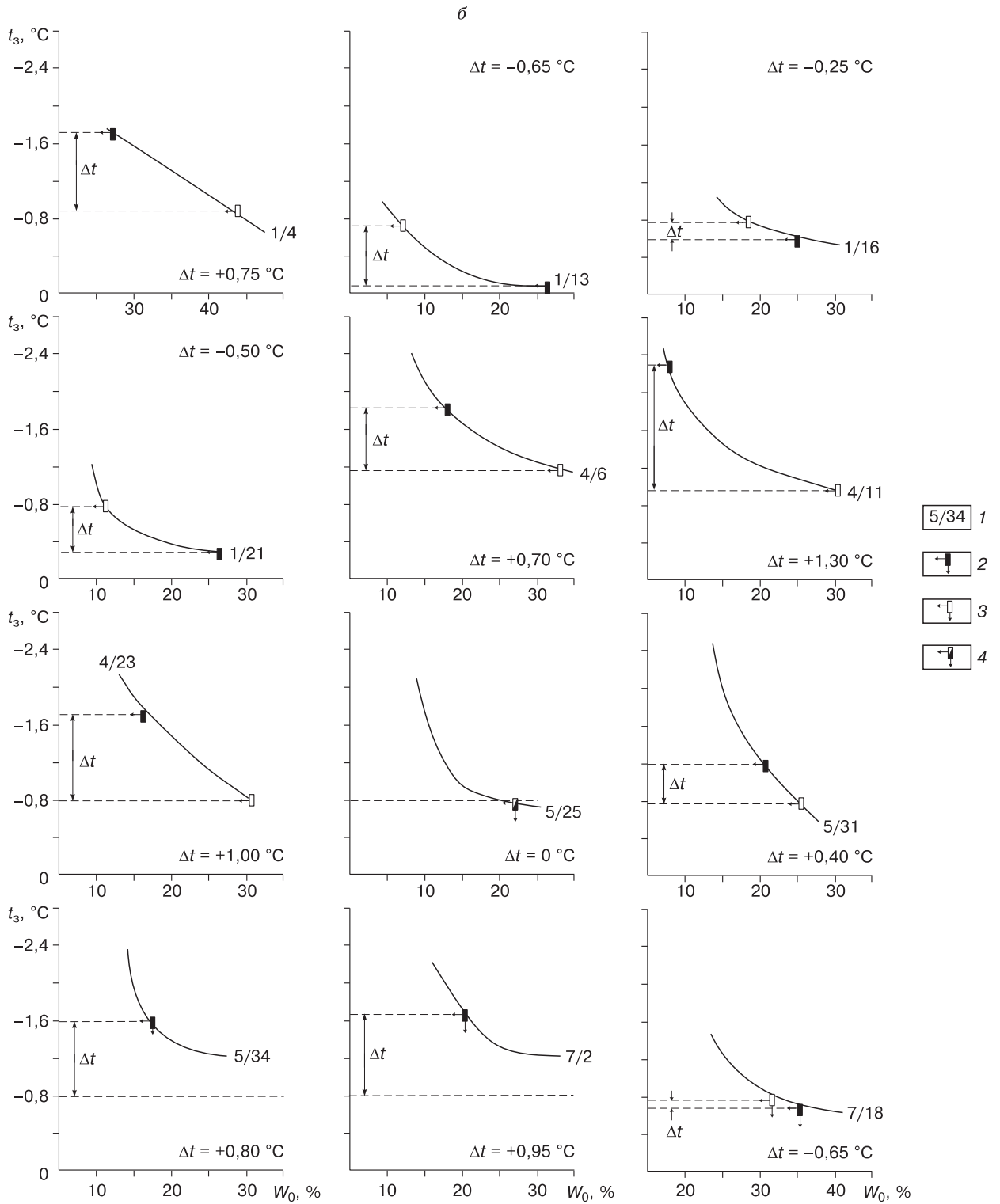
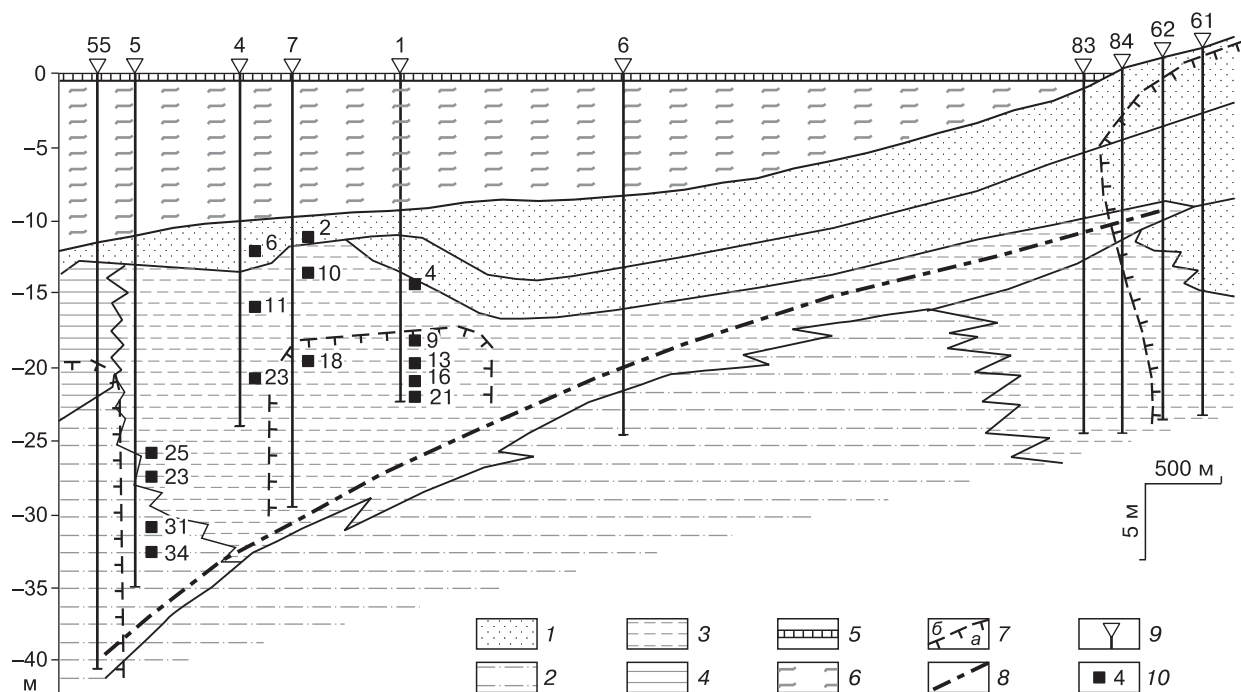


Рис. 2. Расчет величины температурного запаса устойчивости по кривым зависимости количества незамерзшей воды  $W_n$  в спектре опытно задаваемой температуры  $t_0$  (а) и по кривым зависимости температуры начала заморзания  $t_3$  в спектре опытно задаваемой влажности  $W_0$  (б).



1 – в числителе номер скважины, в знаменателе номер образца; 2 – значение  $t_3$  при природной влажности; 3 – значение  $t_e$ ; 4 – неустойчивое равновесное состояние ( $t_e = t_3$ ).



**Рис. 3. Геокриологический разрез по линии I–I:**

1 – песок; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – глина; 5 – морской лед; 6 – морская вода; 7 – граница между мерзлыми (а) и охлажденными (б) толщами; 8 – плоскость зоны скольжения оползня; 9 – скважина и ее номер; 10 – место отбора образца монолита и его номер.

слойки. Подобное охлажденно-мерзлое или мерзлоохлажденное(?) состояние наиболее объяснимо с позиции криптокриодиagenеза (продукт активного криосинерезиса).

**3. Компрессионный криодиagenез.** Морское подводное оползнеобразование представляет большой интерес не только в качестве основного фактора, способствующего дислокационному криодиagenезу осадков. Рассмотрим участок, границы которого соответствуют области аккумуляции сносимого вниз по склону материала. Здесь под телом оползня (ниже зоны скольжения) в толще морских отложений скачкообразно повысится давление за счет поступившей сюда оползневой массы, что в свою очередь скажется на  $t_3$  поровой влаги в осадках – она понизится. В результате величина  $\Delta t$  охлажденных пород возрастет по модулю, фиксируя в разрезе более устойчивый (стабильный) тип физического состояния. При наличии здесь мерзлых отложений (гипотетически) их величина  $\Delta t$  будет стремиться к нулевому барьеру модификационного перехода, т. е. к неустойчивому (метастабильному) типу мерзлого состояния, а при близости значений  $t_c$  и  $t_3$  мерзлые отложения могут перейти в охлажденное состояние. Такой криодиagenез, зависящий от давления вышележащей толщи, назван нами компрессионным.

Известно, что образование газогидратов происходит либо при понижении температуры пород ниже равновесной, либо при повышении давления выше равновесного, либо при оптимальном сочетании этих двух факторов. В нашем конкретном случае важен последний вариант. По причине скачкообразного повышения давления в отложениях ниже зоны скольжения оползней могут возникать (при наличии здесь газового вещества) благоприятные условия для газогидрообразования, которое сопровождается выделением большого количества тепла. Это скажется на естественной температуре – она повысится. В результате два параметра  $t_c$  и  $t_3$ , накладываясь друг на друга и действуя взаимно (увеличение давления – понижение  $t_3$ , газогидрообразование – повышение  $t_c$ ), будут формировать конкретный компрессионный подтип криодиagenеза.

**4. Декомпрессионный криодиagenез.** При исследовании негативных явлений при бурении скважины в криолитозоне (образование ледяных пробок, “прихват” бурового оборудования и др.) был выдвинут механизм, объясняющий природу трансформации породы из охлажденного состояния в мерзлое. При проходке скважин в породах (в приконтактной части на забое) происходит частичное снятие горного давления, что, естественно, сказыва-



ется на  $t_3$  – она повышается. Это, в свою очередь, может привести к смене знака величины  $\Delta t$  и к переходу породы из охлажденного состояния в мерзлое. В этом случае происходит смена физического состояния без понижения  $t_e$  [Маслов, Маслов, 2003]. В то же время известны многочисленные случаи, когда при бурении криогенных толщ происходят внезапные выбросы флюида и инструмента, ведущие к образованию грифонов, иногда – к пожарам. Первопричиной этого является наличие здесь газогидратов. Их разложение происходит при понижении давления ниже равновесного, что сопровождается значительным поглощением тепла и, соответственно, понижением  $t_e$ . Кроме того, увеличение объема газа приводит к снижению температуры за счет дроссельного эффекта, что способствует дополнительному льдообразованию [Маслов, Васильева, 2005].

Теперь рассмотрим поведение охлажденных пород на участке, соответствующем зоне денудационного сноса. На “оголенном” участке охлажденные породы, не вовлеченные в активную сферу деятельности тела оползня, будут испытывать режим декомпрессии. В результате здесь значения  $t_3$  поровых растворов охлажденных пород повышаются (резкое снятие напряжений за счет оползневой разгрузки), а величина  $\Delta t$  уменьшается по модулю, фиксируя менее устойчивый тип охлажденного состояния (по отношению к исходному), а при определенных условиях (например, при близости значений  $t_e$  и  $t_3$ ) формируется неустойчивый (метастабильный) тип и даже возможен переход в мерзлое состояние. Это условие соблюдается при  $t_e = \text{const}$ . При наличии в рассматриваемой охлажденной толще газогидратов процесс криодиagenеза может резко активизироваться за счет как повышения  $t_3$ , так и одновременного понижения  $t_e$  (при разложении газогидратов). В результате два параметра ( $t_e$  и  $t_3$ ), избирательно взаимодействуя в одном направлении – уменьшение давления (повышение  $t_3$ ) и разложение газогидратов (понижение  $t_e$ ), предопределяют декомпрессионный подтип криодиagenеза.

### 5. Прибрежный (смешанный) криодиagenез.

Это особый вид криодиagenеза, характерный для зоны, включающей литораль (мелководье), пляж и лайду. В прибрежной полосе одновременно действуют, накладываясь друг на друга или сезонно сменяясь, различные процессы и явления. Во-первых, здесь созданы необходимые граничные условия для формирования (на стыке многолетнемерзлых и охлажденных пород) мерзлых “kozyрьков”: промерзание сверху и сбоку. На рис. 4 представлен разрез криогенной толщи, слагающей прибрежную зону (восточная часть профиля I–I, см. рис. 1, 3). Разрез отражает многослойное строение пород по физическому состоянию. При промерзании осадков сверху и отжатию вниз рассолов последние

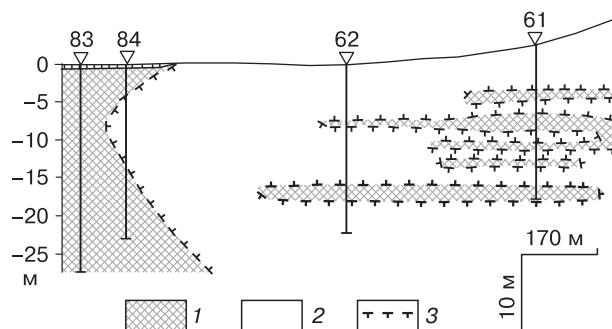


Рис. 4. Строение криогенной толщи в прибрежной (переходной) зоне:

1 – охлажденные породы; 2 – мерзлые породы; 3 – граница между мерзлыми и охлажденными породами.

формировали песчано-суглинистые охлажденные, сильно минерализованные прослои, близкие к разряду криопэггов. На рис. 5 приводится специфический, распространенный в переходной зоне характер распределения естественной температуры. Во-вторых, здесь образуется единый сезонномерзлый слой (на мелководье при промерзании через припайный лед), который затем переходит в охлажденное или талое состояние, осложняемое криосинерезисом и синерезисом. Наконец, сама прибрежная часть с характерным для нее изменяющимся сезонно температурным режимом является своеобразной зоной дополнительного криодиagenеза отложе-

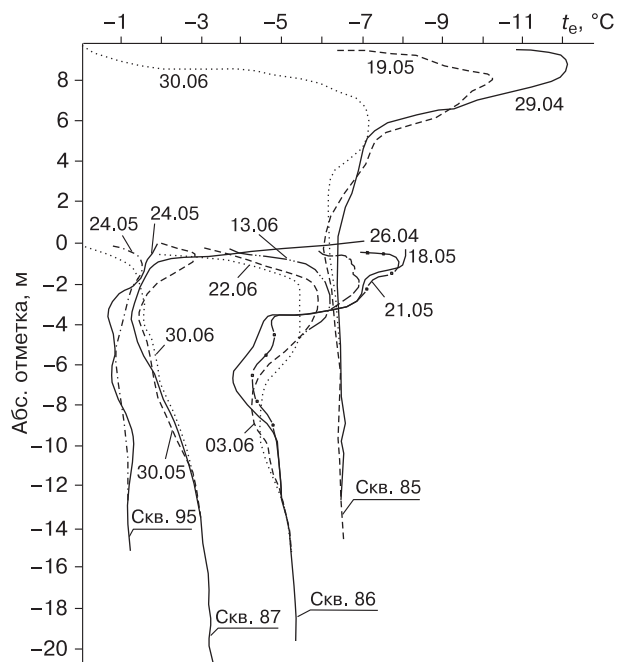


Рис. 5. Режимные термометрические наблюдения в скважинах прибрежной зоны разреза II–II.

ний, переходящих из субаквальных условий развития в субаэральные (или наоборот), например, морских отложений сублиторали, прошедших ранее стадию седиментационного криодиогенеза. Вторичный криодиогенез в прибрежной зоне испытывают и пликвативные слои, прошедшие прежде стадию дислокационного криптокриодиогенеза.

Следует отметить, что переходная зона, достаточно исследованная с точки зрения особенностей ее мерзлотного строения, остается в то же время малоизученной с позиции развивающихся здесь процессов криодиогенеза.

## ВЫВОДЫ

1. Криосинерезис – процесс консолидации формирующихся морских осадков в диапазоне значений естественных температур от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $t_3$ . Ему принадлежит ведущая роль в физико-механическом и физико-химическом преобразовании морских осадков арктического и антарктического шельфа. Выделено два вида криосинерезиса.

- Собственно криосинерезис (пассивный) – процесс, сопутствующий осадконакоплению произвольного и гравитационного самоуплотнения; он сопровождается (в отличие от синерезиса) меньшими значениями сжимаемости при большем времени стабилизации осадка при уплотнении; характерной и специфической особенностью механизма консолидации грунта являются увеличение в нем (при отжати влаги из осадка) концентрации остаточного порового раствора и, соответственно, понижение температуры начала замерзания.

- Активный криосинерезис – процесс, связанный с подводным оползнеобразованием и контролирующий перераспределение поровой влаги внутри сминающихся слоев в теле оползня под действием напорных гидроградиентов; он может сопровождаться качественными изменениями физического состояния грунтов: переходом отдельных слоев из охлажденного состояния в мерзлое.

2. Субмаринный (субаквальный) тип криодиогенеза включает несколько подтипов.

- Седиментационный криодиогенез, доминирующий на арктическом шельфе за счет преимущественного распространения здесь охлажденных пород. Он регулируется собственно криосинерезисом (пассивным) – процессом, в результате которого морские донные осадки, уплотняясь и избирательно отжимая поровый раствор, постепенно отдалаются от своего нулевого барьера модификационного перехода (от  $\Delta t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в сторону более устойчивого охлажденного состояния, что практически исключает (без изменения внешних факторов) вероятность их промерзания.

- Пликвативно-дислокационный криодиогенез (криптокриодиогенез) регулируется активным криосинерезисом – процессом, дифференцирую-

щим перераспределение порового раствора в оползневых складках и слоях; в результате этого в конечном счете часть отложений может перейти в мерзлое состояние, что предопределяет одновременное соседство парагенетически связанных между собой морских осадков (без изменения значений  $t_c$ ) в охлажденном (также претерпевших криодиогенез), неустойчивом равновесном (при  $\Delta t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и мерзлом состояниях (наглядным примером является рассмотренный выше подводный оползень Харасавэйской структуры).

- Компрессионный криодиогенез развит на участках подводного оползнеобразования: на площадях, находящихся под оползнями (ниже зоны скольжения); величина  $\Delta t$  возрастает за счет понижения  $t_3$  (увеличение давления), в результате этого здесь фиксируется более устойчивый тип охлажденного состояния.

- Декомпрессионный криодиогенез приурочен к площадям оползнеобразования (развит в зоне, откуда сошел оползневый материал): здесь значения  $t_3$  поровых растворов повышаются (быстрое частичное снятие горного давления), а положительная величина  $\Delta t$  уменьшается, в результате чего возникает менее устойчивый (по сравнению с исходным положением) тип охлажденного состояния; при близости значений  $t_c$  и  $t_3$  и при большой массе сносимого материала возможен (теоретически) переход осадков в мерзлое состояние.

- Прибрежный (смешанный) криодиогенез соответствует зоне мелководья – участкам литорали, пляжа и лайд; он характеризуется переходными чертами, здесь взаимодействуют субаквальные и субаэральные условия развития – пассивный криосинерезис, сезонно сменяющийся синерезисом; происходит промерзание осадков сбоку (со стороны суши), а также сверху, в том числе через морской лед или криопэги.

3. При переходе морских отложений, претерпевших различные стадии субмаринного криодиогенеза в субаэральный режим развития, они будут подвергнуты криогипергенезу, а также новому этапу криодиогенеза, эпигенетически наложенному на предыдущие преобразования: произойдет промерзание охлажденных пород, а также ранее мерзлых слоев и складок (увеличение льдистости за счет низких значений  $t_c$ ).

4. Вышеизложенный материал дает основание трактовать понятие “субмаринный тип криодиогенеза” (термин А.И. Попова) в более широком смысле, не ограничивая его лишь сферой действия подводного оползнеобразования. Совершенно очевидно, что его географические границы должны быть значительно расширены, так как они регулируются областью действия пассивного криосинерезиса. Следовательно, субмаринный (субаквальный) тип криодиогенеза – явление зональное (широтное).

## Литература

- Ананян А.А.** О причинах понижения температуры замерзания тонкодисперсных горных пород и наличия незамерзшей воды в них // Инж. геология, 1980, № 3, с. 130–134.
- Геологический словарь.** М., Недра, 1973, т. 2, 448 с.
- Горькова И.М.** Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М., Стройиздат, 1975, 150 с.
- Маслов А.Д.** Физико-механические и теплофизические свойства донных отложений юго-восточной части Баренцева и юго-западной части Карского морей // Инженерно-геологические свойства донных отложений Мирового океана. Л., Севморгеология, 1985, с. 51–63.
- Маслов А.Д.** Криолитогенез в условиях литорали и сублиторали Северной Евразии // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1986, № 4, с. 79–85.
- Маслов А.Д.** Криодиогенез в условиях субквального осадконакопления // Проблемы геокриологии. М., Изд-во Моск. ун-та, 1988, с. 234–243.
- Маслов А.Д.** Криосинерезис и его роль в преобразовании морских осадков на стадии диагенеза // Инж. геология, 1992, № 1, с. 40–49.
- Маслов А.Д.** Условия формирования мерзлых отложений на арктическом шельфе // Материалы Третьей конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, т. 1, с. 182–188.
- Маслов А.Д.** Изучение физического состояния пород криолитозоны // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 4, с. 44–55.
- Маслов А.Д., Васильева З.А.** О разработке комплекса признаков наличия газогидратов в криолитозоне // Материалы Третьей конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, т. 1, с. 263–270.
- Маслов А.Д., Маслов Д.А.** Трансформация пород криолитозоны из охлажденного состояния в мерзлое в процессе бурения // Материалы Междунар. конф. “Криолитосфера как среда жизнедеятельности”. Пушино, 2003, с. 152–153.
- Мельников В.П., Спесивцев В.И.** Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск, Наука, 1995, 198 с.
- Мельников В.П., Спесивцев В.И.** Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск, Наука, 2000, 344 с.
- Попов А.И.** О дислокациях и криолитогенезе в Северной Евразии // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1981, № 3, с. 3–10.
- Соколов В.Н., Осипов В.И.** Физико-химическая механика природных дисперсных систем / Под ред. Е.Д. Щукина. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 264 с.

*Поступила в редакцию  
13 декабря 2007 г.*