

## СТРОЕНИЕ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КРИОГЕННОЙ ТОЛЩИ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ

**Н.В. Иванова, Ф.М. Ривкин, Ю.В. Власова**

*ФГУП Фундаментпроект, 125993, Москва, Волоколамское ш., 1, Россия, f-rivkin@narod.ru*

На основе детальных инженерно-геокриологических исследований на Варандейском ключевом участке охарактеризованы особенности строения криогенной толщи на побережье Печорского моря в зависимости от состава, засоленности и температуры пород. Показана специфика промерзания современных морских отложений при воздействии процессов засоления и рассоления пород. Реконструирована история формирования криогенной толщи на арктическом побережье в позднплейстоцен-голоценовое время.

*Арктическое побережье, криогенная толща, многолетнемерзлые породы, охлажденные породы, засоленность, криопэгги*

### THE PERMAFROST STRUCTURE AND FORMATION REGULARITIES ON THE PECHORA SEA COAST

**N. V. Ivanova, F. M. Rivkin, U. V. Vlasova**

*FGUP Fundamentproject, 125993, Moscow, Volokolamskoye sh., 1, Russia, f-rivkin@narod.ru*

On the basis of detailed engineering-geocryological investigations the permafrost structure of the Arctic coast has been characterized. Permafrost structure is characterized using the analysis of frozen and cooled ground distribution, ground temperature, lithology and salinity (Pechora Sea, Varandey key site). The freezing specifics of the modern marine sediments under the influence of the salting and desalting processes has been shown. The Late Pleistocene-Holocene permafrost formation on the Arctic coast has been reconstructed.

*Arctic coast, permafrost, frozen grounds, cooled grounds, salting, cryopegs*

### ВВЕДЕНИЕ

Строение криогенной толщи на арктическом побережье определяется распространением пород различного состояния (твердомерзлого, пластично-мерзлого, охлажденного), которое связано, в первую очередь, с их составом, засоленностью и температурой. Следует отметить, что засоленность грунтов Европейского Северо-Востока изучена недостаточно, особенно по сравнению с севером Западной Сибири и Югорским п-овом в районе пос. Амдерма. Отдельные сведения о степени засоления четвертичных отложений на побережье Печорского моря содержатся в публикациях В.Д. Безроднова [1966], И.Д. Данилова [1978], С.Е. Суходольского [1982], А.Д. Маслова [1985], В.В. Орлянского [1985] и других, а также в материалах изысканий СО ВНИИОСПа, ПНИИИСа, Фундаментпроекта, ПечорНИПИнефти, Архангельскгеологии, Полярноуралгеологии (фондовые материалы). Специальные целенаправленные исследования закономерностей распространения засоленных пород и обусловленных ими особенностей строения криогенной толщи на побережье отсутствуют. Вместе с тем актуальность подобного исследования очевидна и диктуется интенсифика-

цией промышленного и хозяйственного освоения региона в связи с разведкой и обустройством нефтегазоносных месторождений, строительством терминалов и прокладкой трубопроводов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Настоящее обобщение выполнено по материалам детальных инженерно-геокриологических исследований в 2000–2004 гг. на побережье Печорского моря в районе пос. Варандей и Хайпудырской губы. Полученные нами результаты подтверждают мнение о наличии на арктическом побережье Европейского Северо-Востока засоленных грунтов и криопэггов [Геокриология СССР, 1988] и расширяют представления о строении криогенных толщ на разных геоморфологических уровнях морского генезиса.

Варандейский ключевой участок расположен в районе проектируемых объектов берегового резервуарного парка и охватывает часть побережья протяженностью 12 км от пос. Варандей до р. Песчанка. Вдоль берега моря здесь тянется полоса пляжей шириной 20–30 м с береговыми валами.

За ними располагается высокая лайда, имеющая относительно плоскую песчаную поверхность с абсолютными отметками в основном до 3–4 м, с останцами древних береговых валов высотой до 5–6 м, разделенных цепочками вытянутых озер и заболоченных понижений. Происхождение озер на лайде связано с отчленением от акватории заливов при отступании моря и формировании аккумулятивных форм: баров и кос. Низкая лайда, прилегающая к долинам связанных с морем рек и проток (Песчанка, Промой, Варандейский Шар), представляет собой плоскую обводненную поверхность высотой до 1,0–1,5 м, периодически заливаемую морем во время приливов и нагонов. Ширина лайды составляет 1–3 км, в глубь суши и на правобережье р. Песчанка она сменяется I морской террасой с абсолютными отметками 5–12 м и плоской, слаборасчлененной, заозеренной и заторфовой поверхностью.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования позволяют выявить особенности строения криогенных толщ в зависимости от засоленности слагающих их отложений (рисунок). Распространение легкорастворимых солей в породах на разных геоморфологических уровнях и в разрезе имеет закономерный характер, обусловленный особенностями их формирования и промерзания. Засоление относится к морскому типу и связано с морским генезисом отложений. Пространственная изменчивость величины засоления пород и химического состава солей в них определяется в основном следующими факторами:

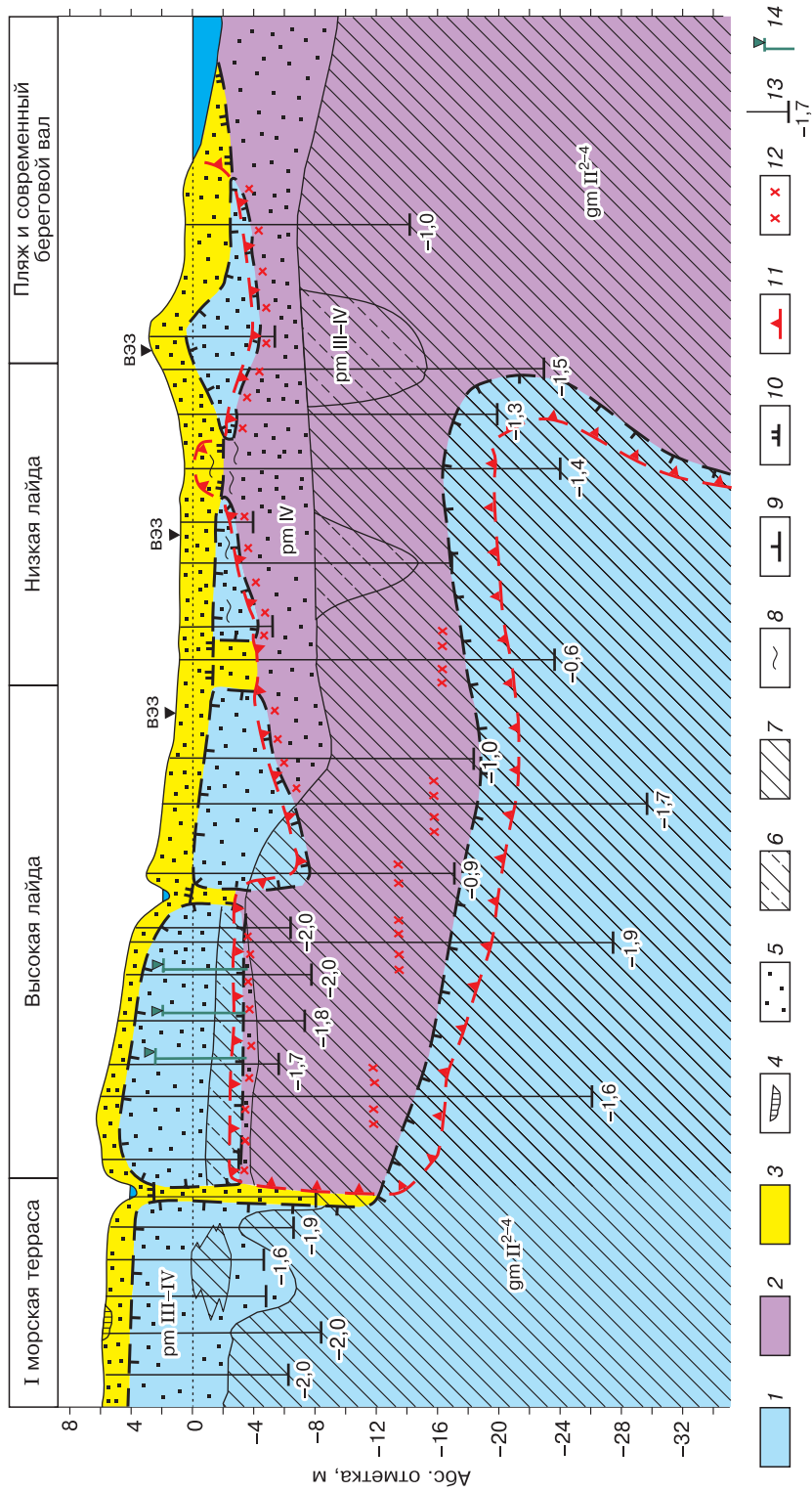
- фациальными условиями накопления осадков в прибрежной зоне моря, в первую очередь концентрацией солей в придонном слое воды;
- изменениями солевого состава пород в процессе их рассоления после выхода из-под уровня моря;
- дифференциацией солей в процессе промерзания морских осадков, которое сопровождалось их криогенным концентрированием в поровом растворе и перераспределением солей по разрезу.

Степень засоления пород на побережье изменяется в широких пределах – от сотых долей до 1,5 % массы сухого грунта. Наибольшим засолением характеризуются грунты низкой лайды, заливаемой в нагоны и приливы морской водой. Здесь практически от поверхности или под сезонномерзлым слоем, т. е. с глубины 0,3–2,0 м, залегают охлажденные грунты с содержанием солей от 0,15 % в песках до 0,5–1,6 % в заиленных супесях и илах. Сохранению солей в поверхностном горизонте на низкой лайде способствуют присутствие тонкодисперсных илов и сплошной растительный покров, что ухудшает условия для вымывания солей пресными атмосферными водами. На припод-

нятых участках низкой лайды, а также в ее тыловых частях, несмотря на близость моря и морской генезис осадков, грунты до глубины 3–5 м нередко бывают рассолены, содержание солей в них не превышает 0,05–0,40 %, и вследствие этого грунты находятся в мерзлом состоянии. В целом на фоне сплошного по площади и разрезу распространения отрицательно-температурной криогенной толщи для низкой лайды характерно островное распространение многолетнемерзлых пород (ММП), что обусловлено широким развитием здесь засоленных грунтов. Средняя годовая температура мерзлых пород не опускается ниже  $-0,5...-1,5$  °С. Здесь нередко формируются породы со своеобразным криогенным строением: пески с массивной криотекстурой и суглинки со слоисто-сетчатым строением чередуются с прослоями охлажденных пород с единичными кристаллами и гнездами льда, не цементующими грунт. Острова ММП мощностью не более 1–4 м подстилаются и сменяются в плане сильнозасоленными охлажденными грунтами с содержанием солей до 1,0–1,5 %. На пляже и береговых барах мощность слоя рассоленных мерзлых песков составляет 1–5 м, постепенно увеличиваясь к тыловой части, где бары смыкаются с высокой лайдой.

На высокой лайде верхний горизонт мерзлых песков до глубины 5–8 м рассолен, содержание солей в них в основном менее 0,05 %, грунты этого горизонта находятся в твердомерзлом состоянии и многолетнемерзлые породы имеют сплошное (по площади) распространение. В основании мерзлого горизонта засоленность грунтов несколько увеличивается (до 0,3 % в супесях и суглинках), грунты переходят в пластично-мерзлое состояние. В подстилающих охлажденных породах содержание солей резко возрастает и составляет 0,4–1,1 % в песках и 0,5–1,5 % в супесях и суглинках.

С горизонтом охлажденных пород, залегающим ниже слоя мерзлых грунтов, связаны напорные отрицательно-температурные минерализованные воды – криопэги, которые очень широко распространены на высокой и низкой лайде и приурочены к прослоям песков и контактам последних с водоупорами. В пределах высокой лайды напорные криопэги были обнаружены на глубинах 6–15 м, на низкой лайде они могут быть встречены и выше по разрезу, начиная с глубин 3–5 м. Минерализация криопэгов составляет 16–32 г/л при температуре вмещающих пород  $-1,0...-2,0$  °С. Химический состав рассолов независимо от минерализации однотипный хлоридно-натриевый (табл. 1). Подмерзлотные криопэги обладают напором, величина которого зависит от глубины вскрытия и составляет на высокой лайде от 4 до 10 м, уровень воды устанавливается на 2–3 м выше уровня моря. В охлажденных грунтах на низкой лайде возможны безнапорные криопэги.



**Строение криогенной толщи на побережье Печорского моря (Варандей):**

1 – многолетнемерзлые породы; 2 – охлажденные породы; 3 – талые породы; 4 – торф; 5 – пески; 6 – переслаивание суглинков, супесей и песков; 7 – суглинки; 8 – илы; 9 – граница многолетнемерзлых пород; 10 – граница сезонномерзлых пород; 11 – граница засоленных пород; 12 – криопегги; 13 – инженерно-геологическая скважина и средняя годовая температура пород; 14 – появление и установившийся уровень криопогов.

Таблица 1. Минерализация и химический состав подземных и поверхностных вод

№ п/п	Тип воды	Глубина отбора, м	Минерализация, мг/л	рН	Содержание, мг/л						
					K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
1	Вода СТС	1,5	89,8	7,13	1,3	17,7	4,8	2,0	21,3	0,0	42,7
2	Криопэг	12,0	31 571,8	6,81	263,0	8620,0	1681,0	600,0	17 040,0	2831,0	536,8
3	Озеро на высокой лайде	0,1	60,1	6,71	0,4	2,8	7,2	4,0	21,3	0,0	24,4
4	Море	0,3	25 297,8	7,6	275,0	7585,0	1068,0	400,0	15 442,0	393,6	134,2

Своеобразный криогидрохимический разрез формируется в подозерных таликах [Rivkin, 1998] на высокой лайде, где под пресноводными озерами с минерализацией воды 50–64 мг/л (см. табл. 1) и тальми незасоленными грунтами с глубины 6–10 м залегают охлажденные засоленные грунты с содержанием солей 0,3–1,0 %, песчаные прослойки в них насыщены минерализованными водами. Здесь изменение концентрации солей по разрезу подчиняется известному для талых пород закону вертикальной гидрохимической зональности, когда тяжелые рассолы перемещаются вниз и не происходит перемешивания растворов разной концентрации.

Состав легкорастворимых солей в охлажденных грунтах преимущественно хлоридно-натриевый, как и в криопэгах, хотя в составе солей в зависимости от условий залегания пород отмечается определенная дифференциация. Так, в слое охлажденных песчано-сушесчаных грунтов и в пластично-мерзлых грунтах нередко фиксируется снижение содержания хлоридов и увеличение сульфатов и гидрокарбонатов, в отдельных прослоях отмечается сульфатный тип засоления. Примечательно, что сульфатное засоление характерно, как правило, для темно-серых заиленных песков и супесей и черных илов, обогащенных тонкодисперсным органическим веществом. Повышенное содержание сульфатов в водных вытяжках из этих грунтов связано, по-видимому, с окислением гидротроилита. Этот минерал, как известно, образуется в восстановительной среде в донных морских осадках и оказывается крайне неустойчивым в поверхностных окислительных условиях. Данная трактовка природы сульфатного засоления в заиленных грунтах лайды подтверждается установленным фактом возрастания количества сульфатов в водной вытяжке по мере хранения грунта в лаборатории в талом состоянии. В связи с этим следует подчеркнуть, что определенная в таких случаях в лаборатории после длительного хранения образцов степень засоления грунтов является завышенной.

Ледово-морские (роговские) суглинки, слагающие цоколь лайды, также засолены, причем прослеживается отчетливое снижение их засоленности с глубиной. Так, верхняя часть роговских

суглинков на низкой лайде засолены до 0,6–1,0 % и представлена охлажденными грунтами, а с глубины 14–17 м засоление суглинков снижается до 0,3–0,5 %, грунты на этих глубинах находятся в пластично-мерзлом состоянии. На высокой лайде аналогичное снижение засоленности роговских суглинков и переход их в мерзлое состояние, по данным бурения и геофизики, отмечается на глубинах 18–25 м. Наличие второго от поверхности горизонта ММП (см. рисунок) связано, по-видимому, с промерзанием (в период после климатического оптимума голоцена) рассоленных маловлажных (суммарная влажность 13–17 %) среднеплейстоценовых суглинков.

Повышенная засоленность верхней части разреза роговских суглинков (см. рисунок) объясняется инфильтрацией соленых вод в слаболигифицированные дисперсные породы при накоплении осадков лайды, а также отжатием солей вниз в талую зону в процессе промерзания этих осадков. Аналогичное, но значительно более слабое (до 0,2–0,3 %) засоление роговских суглинков отмечается и в цоколе I морской террасы на глубинах 8–12 м.

На Варандейском участке разрез I морской террасы сложен мерзлыми, преимущественно незасоленными, редко слабозасоленными грунтами, в составе солей преобладают гидрокарбонаты и сульфаты. Более высокие уровни морских террас и равнин до глубины 30 м и более сложены незасоленными породами. Здесь уместно отметить, что средне- и верхнеплейстоценовые морские и ледово-морские отложения, слагающие террасы и водоразделы на Европейском Северо-Востоке, рассолены до глубин 50–100 м (засоленность суглинков не превышает 0,1–0,2 %) и лишь ниже залегают засоленные породы с содержанием солей 0,5–1,0 % и хлоридно-натриевым типом засоления [Безроднов, 1966; Данилов, 1978].

Засоленность грунтов наряду с их температурой определяет состояние грунтов в зоне отрицательных температур (твердомерзлое, пластично-мерзлое, охлажденное) и существенно влияет на их физико-механические свойства. Отмеченные особенности в распределении солей используются при районировании и картировании территории по степени засоленности грунтов. При этом в соответствии с ГОСТ 25100-95 [1996] и [Рекомендации-

Таблица 2. Разновидности грунтов по степени засоления и состоянию

Разновидности грунтов	Состояние грунтов	Суммарное содержание легкорастворимых солей, % от массы сухого грунта (температура $-1...-2$ °С)		
		Пески	Супеси	Суглинки
Незасоленные	Твердомерзлые	0–0,05	0–0,15	0–0,2
Слабозасоленные	Пластично-мерзлые	0,05–0,1	0,15–0,4	0,2–0,5
Среднезасоленные	Охлажденные	0,1–0,2	0,4–0,6	0,5–1,0
Сильнозасоленные	Охлажденные	>0,2	>0,6	>1,0

ями..., 2001] для исследуемого района приняты разновидности грунтов по степени засоления, представленные в табл. 2.

Анализ приведенных материалов свидетельствует о тесной зависимости таких параметров инженерно-геокриологического разреза, как состав, состояние, засоленность и температура пород, а также позволяет связать эти параметры с условиями промерзания пород на низких геоморфологических уровнях арктического побережья Печорского моря.

На наиболее пониженных участках низкой лайды в зоне непосредственного влияния моря с поверхности залегают засоленные охлажденные грунты, непромерзающие из-за повышенного содержания солей и относительно высоких отрицательных температур грунта ( $-0,5...-1,5$  °С). Низкая лайда находится под воздействием двух разнонаправленных процессов: 1) многократного приноса солей в результате периодического затопления поверхности во время приливов и нагонов с последующим криогенным концентрированием иловых растворов при сезонном промерзании, приводящем к засолению грунтов; 2) рассоления грунтов в результате инфильтрации атмосферных и поверхностных вод, которому способствует их немерзлое состояние. Взаимодействие процессов засоления–рассоления приводит к неоднородному по составу и величине засолению: хлоридному при преобладании процессов засоления и сульфатному на участках выщелачивания грунтов, в первую очередь супесчано-песчаного состава, за счет выноса легкоподвижных хлоридов и обогащения поровых растворов ионами более труднорастворимых солей, прежде всего сульфатов.

По мере выхода поверхности из зоны влияния морских приливов и нагонов процессы выноса солей начинают превалировать над процессами засоления. Рассоление грунтов на отдельных, как правило, относительно возвышенных участках способствует их активному промерзанию, в ходе которого происходит отжатие растворенных солей

от фронта промерзания вниз по разрезу и криогенное концентрирование поровых растворов в водоносных горизонтах на контактах с водоупорами. В результате этих процессов на повышенных участках низкой лайды и в разрезе высокой лайды формируется слой рассоленных ММП, подстилаемый горизонтом охлажденных засоленных глинистых пород с линзами песков, вмещающих криопэги. Продолжающаяся в настоящее время инфильтрация пресных поверхностных и атмосферных вод по тальм зонам способствует постепенному рассолению и последующему промерзанию сверху этого горизонта охлажденных пород.

Таким образом, специфика промерзания морских отложений в регионе заключается в том, что в силу относительно высоких температур пород на лайде (не ниже  $-1,0...-2,0$  °С) в многолетнемерзлом состоянии грунты переходят по мере их рассоления поверхностными водами и отжатия солей от фронта промерзания вниз в тальму зону. Поэтому здесь, в отличие от Ямала, мерзлые породы представлены незасоленными и слабозасоленными разновидностями, а средне- и сильнозасоленные грунты находятся в охлажденном состоянии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное состояние верхней части разреза криогенной толщи побережья Печорского моря обусловлено историей развития региона в позднелайстоцен-голоценовое время. Вслед за длительным этапом (продолжительностью 55–60 тыс. лет, по [Розенбаум, Шполянская, 2000]) среднепозднелайстоценовой трансгрессии арктического бассейна наступила поздневалдайская (сарганская) эпоха (III<sub>4</sub>). Она характеризовалась, по мнению большинства исследователей, максимальным за весь плейстоцен похолоданием (температура воздуха составляла  $-10...-17$  °С) и глубокой регрессией моря (до изобаты 110–130 м) в период 20–18 тыс. лет назад, что привело к осушению значительной части арктического шельфа и к формированию мощной (700–800 м) низкотемпературной криогенной ( $-15...-19$  °С) толщи на освободившихся от моря площадях [Павлидис и др., 1998; Розенбаум, Шполянская, 2000]. С сарганской регрессией моря, по-видимому, связаны и эрозионные врезы глубиной до 15–20 м в кровле среднеплейстоценовых суглинков, которые фиксируются по материалам бурения на Варандейском побережье.

Период позднеледниковья (13,5–10,5 тыс. лет назад) и начала голоцена (10,5–8,0 тыс. лет назад) – III–IV характеризовался начавшимся потеплением климата и последледниковой трансгрессией моря [Розенбаум, Шполянская, 2000], распространявшейся на п-ове Варандей на 20–30 км южнее современной береговой линии. Это время формирования отложений I морской террасы.

Большое значение для истории формирования криогенной толщи региона имела эпоха климатического оптимума голоцена (IV), относящаяся к интервалу 6,5–4,5 тыс. лет назад [Хотинский и др., 1991]. В это время береговая линия в исследуемом регионе располагалась на 1–3 км южнее современной, в пределах высокой лайды. Поверхность I морской террасы вышла из-под уровня моря, на ней сформировались торфяники. Среднегодовые температуры воздуха превышали современные на 2–3 °С и составляли –1...–3 °С, ММП активно протаивали сверху и снизу и сохранились на Европейском Северо-Востоке как реликтовая мерзлая толща на некоторой глубине [Геокриология СССР, 1988]. Мерзлые породы в период климатического оптимума голоцена на рассматриваемом участке протаивали, по-видимому, до 50 м и более. Об этом свидетельствует повсеместное распространение в регионе в разрезах морских террас и водоразделов рассоленных (до глубины 30 м и более) мерзлых пород, а также наличие реликтовых мерзлых пород на шельфе на Варандейской структуре на глубинах 50–70 м (данные АМИГЭ). В этом случае установленный при бурении второй от поверхности слой мерзлых грунтов является современным образованием.

Около 4 тыс. лет назад наступила более холодная эпоха. Температура воздуха была на 1–2 °С ниже современной. Это привело к промерзанию ранее протаявших пород и осадков лайды и формированию современного состояния верхней части разреза криогенной толщи, подробно охарактеризованному выше.

## Литература

- Безроднов В.Д.** К вопросу о химическом составе пород и гидрохимической зональности грунтовых вод Печорской низменности // Геология кайнозой севера Европейской части СССР. М., МГУ, 1966, с. 52–65.
- Геокриология СССР.** Европейская территория СССР. М., Недра, 1988, 358 с.
- ГОСТ 25100-95.** Грунты. Классификация. М., МНТКС, 1996, 30 с.
- Данилов И.Д.** Полярный литогенез. М., Наука, 1978, 238 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., ПГО "Северморгеология", 1985, с. 51–63.
- Орлянский В.В.** Криогенные воды (криопэги) на побережьях Карского и Печорского морей // Криогидрогеологические исследования. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1985, с. 24–34.
- Павлидис Ю.А., Ионин А.С., Щербаков Ф.А. и др.** Арктический шельф. Позднечетвертичная история как основа прогноза развития. М., ГЕОС, 1998, 187 с.
- Рекомендации по определению прочности мерзлых грунтов с морским типом засоления / В.И. Аксенов, Г.И. Дубиков, Н.В. Иванова и др. М., ФГУП ПНИИИС, 2001, 41 с.**
- Розенбаум Г.Э., Шполянская Н.А.** Позднекайнозойская история криолитозоны Арктики и тенденции ее будущего развития. М., Науч. мир, 2000, 104 с.
- Суходольский С.Е.** Парагенезис подземных льдов и многолетнемерзлых пород. М., Наука, 1982, 150 с.
- Хотинский Н.А., Алешинская З.В., Шарбатян А.А. и др.** Новая схема периодизации ландшафтно-климатических изменений в голоцене // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1991, № 3, с. 30–42.
- Rivkin F.M.** Regional specificity of subfluvial talik formation and structure (Yamal peninsula, Russia) // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Permafrost. Yellowknife, Canada, 1998, p. 943–946.

Поступила в редакцию  
23 апреля 2007 г.