

УДК 624.131:551.340

## ЗАСОЛЕННЫЕ МЕРЗЛЫЕ ГРУНТОВЫЕ ТОЛЩИ АРКТИЧЕСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ РОССИИ И ИХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

*В.Т. Трофимов, Н.С. Красилова*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 06.06.17

Определено принятое авторами содержание понятия «засоленные мерзлые грунтовые толщи», приведен обзор взглядов об их происхождении, закономерностях распространения, влиянии на степень засоленности многолетнемерзлых грунтовых толщ литологического состава грунтов, фациальных условий формирования слагающих их грунтов. Рассматриваются особенности изменения степени засоленности грунтовых толщ по разрезу, простирающему и в зависимости от их геоморфологической приуроченности, влияние засоленности мерзлых грунтовых толщ на их физико-механические свойства.

*Ключевые слова:* засоленные мерзлые грунты, морской и континентальный типы засоления, легкорастворимые соли, физико-механические свойства, Арктика.

*Trofimov V.T., Krasilova N.S.* Saline frozen soils of Russian Arctic coast and their engineering-geological specific. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series. 2017. Volume 92, part 4. P. 49–57.

By the authors defined this paper examines the concept of “saline frozen soils”, provides an overview of views about their origin, patterns of spread; impact of lithological composition of soils on the degree of salinity of the permafrost soil strata, facial conditions of formation of soils composing them. The peculiarities of change in the degree of salinity soils on a succession, along the strike and depending on their geomorphic positions, the effect of salinity of frozen soils on their physical and mechanical properties.

*Key words:* saline frozen soils, marine and continental types of salinity, free solving salines, physical and mechanical properties, Arctics.

Под грунтовой толщей принято понимать верхнюю часть разреза массивов горных пород (включая почвы), слагающих различные геоморфологические элементы, которые находятся или могут оказаться в зоне влияния сооружений массовых видов строительства (гражданского, дорожного, сельскохозяйственного, мелиоративного). Грунтовые толщи играют ведущую роль в определении инженерно-геологических условий любой территории, поскольку оказывают огромное влияние на особенности характера рельефа, гидрогеологических и мерзлотных условий, характер развития экзогенных геологических процессов и явлений. В данной работе авторы рассматривают толщу мощностью 10 м. Среди мерзлых грунтовых толщ к категории особых относятся засоленные.

Мерзлые грунты обычно называют засоленными при содержании в них определенного количества легкорастворимых солей: в СНиП 2.02.04-88 к засоленным грунтам были отнесены пески, супеси, суглинки и глины, если их засоленность (отношение массы водорастворимых солей в единице объема грунта к плотности скелета) превышала соответственно значения 0,1, 0,15, 0,2 и 0,25%, хотя во многих работах пылеватые пески морского побережья Севера считались засоленными при засоленности уже более 0,05%. В то же время талые грунты

в соответствии с ГОСТом 25100-95 относятся к засоленным при содержании легко- и среднерастворимых (водорастворимых) солей в песках, супесях и суглинках не менее соответственно 3, 5 и 10%. Но в данном случае речь идет о грунтах, приуроченных преимущественно к районам с отрицательным водным балансом, где развит континентальный тип засоления.

В.И. Панченко и В.И. Аксенов (1990) предложили иной подход к определению категории засоленного грунта. По их мнению, если эквивалентное содержание ионов электролитов в грунте меньше обменной емкости скелета грунта, то ионы взаимодействуют только с поверхностью минеральных частиц и не участвуют в формировании равновесия лед-вода. Такой грунт они считают незасоленным. Если содержание ионов выше обменной емкости, то грунт может считаться засоленным. По мнению А.В. Брушкова (1998), правильнее говорить о легкорастворимых солях (а не просто электролитов) в поровом растворе и считать мерзлые грунтовые толщи засоленными при содержании в поровом растворе легкорастворимых солей в количестве, составляющем более 0,05% по весу в отношении к сухой породе, т.е. величину, при которой уже фиксируется изменение физико-механических свойств грунтов.

В принятом недавно ГОСТ 25 100-2011 к засоленным мерзлым грунтам с морским типом засоления легкорастворимыми солями (хлоридный тип засоления) относятся грунты с содержанием таких солей более 0,05%, с континентальным типом засоления (сульфатный тип засоления) – грунты с содержанием таких солей более 0,10%. Такой подход сейчас используется в научных и изыскательских работах.

Своеобразие инженерно-геологических особенностей мерзлых засоленных грунтов определяется большим содержанием по сравнению с другими мерзлыми грунтами количества незамерзшей воды и ухудшением в связи с этим их физико-механических свойств. Поэтому мерзлые засоленные грунты являются предметом пристального внимания со стороны многочисленных исследователей (Еловская и др., 1966 и др.), в том числе по выяснению закономерностей их распространения (Анисимова, 1985; Данилов, 1978а, б; Дубиков, Иванова, 1990; Полуостров Ямал, 1975; Трофимов и др., 1980 и др.), изучению состава солей (Васильчук, Трофимов, 1984; Дубиков, 1986; Грунтоведение, 2005; Инженерная геология России, 2011; Трофимов, 1977 и др.), условий формирования криопэггов (Инженерная геология России, 2013; Орлянский, 1985 и др.). Проводились экспериментальные исследования физико-механических свойств мерзлых засоленных пород (Брушков, 1998 и др.). Исследованы общие закономерности деформирования и разрушения засоленных мерзлых грунтов (Пекарская, Чапаев, 1979 и др.).

Установленные в результате этих исследований закономерности позволяют сделать обобщенные выводы о характере и степени засоленности грунтовых толщ Арктического побережья России в соответствии с их составом, строением и состоянием.

### О генезисе мерзлых засоленных грунтовых толщ

Засоленные мерзлые грунтовые толщ Арктического побережья имеют на большей его площади морское происхождение, и им свойствен морской хлоридный тип засоления. Они сложены эпи-, диа- и сингенетическими промерзшими породами, причем последние венчают разрез грунтовых толщ различных морских равнин и террас.

Считается (Брушков, 1998), что они могут формироваться двумя путями (рис. 1): 1) в результате первичного морского засоления и последующего промерзания осадка еще в море или при отступлении моря в условиях отрицательных среднегодовых температур (синхронный тип засоления); 2) вторичное засоление происходит после образования отложений при наступлении моря или при проникновении соленых вод другим способом и при последующем промерзании (эпихронный тип засоления).

Засоленность морских мерзлых грунтов вдоль арктического побережья Евразии и на островах изменяется преимущественно в пределах 0,05–2%, в отдельных горизонтах 4–6% и относится по своему составу к морскому типу засоления, для которого характерен хлоридно-натриевый состав поровых вод, обусловленный первичной седиментационной соленостью морских иловых вод. Ионно-солевой состав поровых вод в мерзлых морских четвертичных отложениях характеризуется соотношениями:  $Cl^- \geq SO_4^{2-} > HCO_3^{2-}$  и  $Na^+ \geq Mg^{2+} > Ca^{2+}$ . Состав водных растворов в морских рассоленных породах меняется на хлоридно-сульфатно-натриевый и сульфатно-гидрокарбонатно-натриевый; количество солей в них обычно не превышает 0,1% (Дубиков, Иванова, 1990).



Рис. 1. Основная схема формирования засоленных пород Арктического побережья, по (Брушков, 1998)

Континентальный тип засоления наблюдается в районах, где сочетаются высокие летние температуры воздуха с отрицательным балансом влаги. В солевом составе грунтов континентального типа засоления присутствуют ионы:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ . Такая картина отмечается в Центральной Якутии, в современной долине Лены (рис. 2), где засоление аллювиальных отложений происходит при их образовании в условиях преобладания испарения и накопления солей континентального типа в поверхностной толще (Еловская и др., 1966). Содержание солей в грунтах разного состава колеблется от сотых долей процента до 1,2–2 и даже 5–8%. Максимальное засоление грунтов отмечается в верхних 1–5 м разреза, но иногда прослеживается до глубины 15 м.

И.Д. Даниловым (1978), Ю.К. Васильчуком и В.Т. Трофимовым (1984), А.В. Брушковым (1998) и другими исследователями показано, что преимущественный путь образования мерзлых засоленных пород связан с син- и диагенетическим промерзанием морских и других слаболитифицированных отложений, насыщенных первичными или метаморфизованными морскими водами, реже водами континентального происхождения. Считается, что при осушении морских акваторий, начиная с плейстоцена, происходило охлаждение и частичное промерзание донных отложений, поры которых были заполнены морскими водами. Далее, уже в субэаральных условиях, следовало дальнейшее охлаждение пород. При промерзании рыхлых отложений в первую очередь происходит образование твердой фазы воды — льда. Морские воды с минерализацией менее 30 г/л кристаллизуются в породах при температурах, близких к  $-1,5...-2^\circ\text{C}$ , а рассолы могут не замерзнуть при температурах даже  $-20^\circ\text{C}$  и ниже. В результате образуются и впоследствии сохраняются отдельные линзы и горизонты захороненных морских высокоминерализованных вод с отрицательной температурой — *криопэги*.

Участки охлажденных ниже  $0^\circ\text{C}$  пород с криопэгами отмечены на низких морских террасах и морской лаиде побережья Баренцева моря (Геокриология СССР, 1988), встречаются на побережье Болванской, Паханческой, Хайпудырской и Печорской губ, в дельтах и низовьях рек Нерута, Черная, Морею, Каротаиха. Предполагается наличие таких участков очень ограниченного размера на самом севере п-ва Канин и в приустьевых частях рек Великая и Индига (Брушков, 1998). Засоленные мерзлые грунты пространственно связаны с засоленными охлажденными породами и криопэгами. Переход от одних к другим плавный как по температуре, так и в пространстве, поэтому они объединяются в один тип криогенных засоленных грунтов (Брушков, 1998).

Криопэги характерны для всей криолитозоны полуостровов Ямал и Гыдан (Полуостров Ямал..., 1975). Они обычно приурочены к слоям водопроницаемых грунтов и к их контактам с водоупорами.

Таковыми грунтами часто служат линзы и прослойки песков, поэтому криопэги отличаются невыдержанностью по простиранию, залегают на разной глубине в виде изолированных линз, не связанных друг с другом, с поверхностными и подземными водами. Криопэги, залегающие в верхней части различных террас, повсеместно связаны с прибрежно-морскими отложениями, отмечается их приуроченность к линзам и прослоям обогащенных органическими веществами осадков (Орлянский, 1985; Природные условия..., 1997; Стрелецкая, 1991). По своему химическому составу криопэги аналогичны морским водам, их минерализация составляет 5–150 г/л. По сравнению с морской водой в них наблюдается повышенное содержание  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и пониженное  $\text{Na}^+$  (Природные условия..., 1997).

### Распространение многолетнемерзлых засоленных грунтовых толщ

Многолетнемерзлые засоленные грунтовые толщи широко развиты вдоль побережья северных арктических морей в европейской части России, в Западной и Восточной Сибири. В европейской части России они характерны для Канинско-Тиманского и Мало-Большеземельского регионов, в Западной Сибири особенно широко развиты на Ямале; в Восточной Сибири — вдоль побережий Якутии и Чукотского полуострова, на Анадырской низменности, где засоление распространено узкой полосой вдоль побережья океана в мерзлых породах различного генезиса и состава. Южную границу распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов (рис. 2) связывают с границей оттаивания мерзлых пород с поверхности во время климатического оптимума голоцена, оказавшего существенное влияние на сохранение как сингенетической, так и эпигенетической засоленности в многолетнемерзлых породах (Брушков, 1998). Предполагается, что на европейской территории России это оттаивание могло достигнуть широты  $68-69^\circ$  с.ш. (Баулин и др., 1981а). Для Западной Сибири эта граница проходила, вероятно, по широте Полярного круга (Баулин и др., 1981б). Южнее этой границы залегание мерзлых толщ с морским засолением с поверхности проблематично (Брушков, 1998).

### Факторы, влияющие на степень засоленности многолетнемерзлых грунтовых толщ

Изменение засоленности мерзлых грунтов Арктического побережья России по глубине и по простиранию связано с их составом и строением и определяется условиями формирования и промерзания грунтов, а также последующими процессами в мерзлых толщах. Рассмотрим влияние лишь трех из этих факторов — литологического состава толщ, фациальных условий их формирования и возраста отложений.

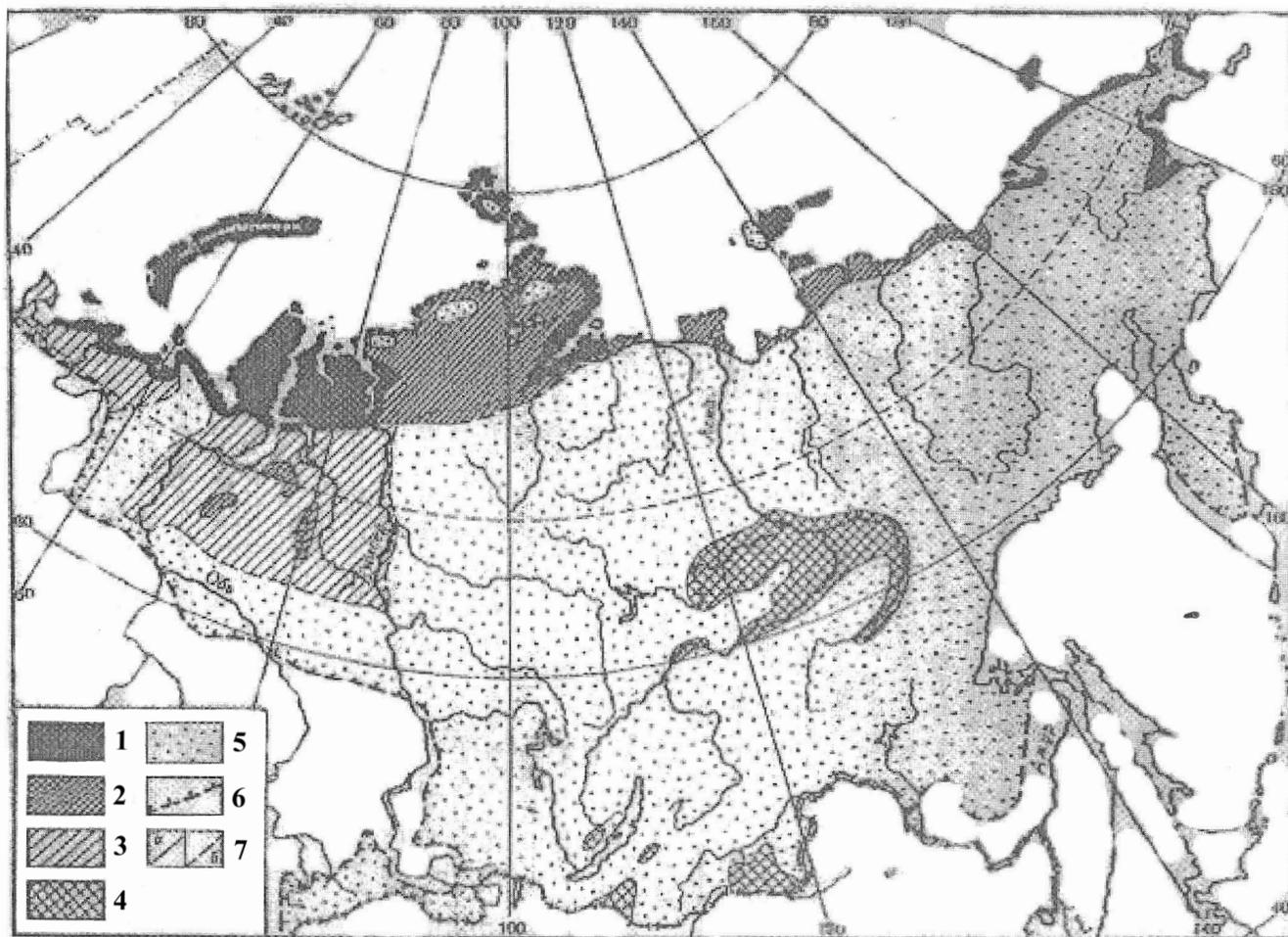


Рис. 2. Схема распространения засоленных мерзлых пород на территории России, по (Дубиков, Иванова, 1990): 1–3 – морской тип засоления пород: 1 – засоленные породы залегают ниже сезонноталого слоя, 2 – кровля засоленных пород на глубинах до 50 м, 3 – кровля засоленных пород преимущественно глубже 50 м, с поверхности – рассоленные и незасоленные породы; 4 – континентальный тип засоления пород, засоленные породы залегают с поверхности; 5 – незасоленные и рассоленные породы (до глубины 100 м); 6 – южная граница многолетнемерзлых пород; 7 – границы распространения засоленных пород: а – установленные, б – предполагаемые

Прослеживается четкая зависимость содержания легкорастворимых солей в мерзлых грунтовых толщах от их *литологического состава*. Песчаные разности пород содержат солей в 2–8 раз меньше, чем глинистые, а среди последних наиболее засолены глины и тяжелые глины (Дубиков, 1986; Трофимов и др., 1980). Если для песков отмечается засоленность в пределах 0,2–0,5%, то в супесях, суглинках и глинах она колеблется от 0,4 до 2,1%. Большую засоленность глинистых грунтов отмечали и другие исследователи (Дубиков, Иванова, 1990; Инженерно-геологический мониторинг..., 1996), объясняя это тем, что глинистые породы в большей степени способны сохранять седиментационную засоленность и промерзают, накапливая соли, в мерзлой толще.

Характер сочетания песчаных и глинистых пород в грунтовой толще влияет на степень засоленности разных ее частей, обуславливая общую неоднородность ее засоленности по глубине. Наиболее четко это должно проявляться в двучленных типах грунтовых толщ – преимущественно песчаных

с преобладанием глинистых в верхней части и преимущественно глинистых с преобладанием песчаных в верхней части. Более сложное сочетание в грунтовой толще песчаных и глинистых разностей может привести к чередованию слоев с разной засоленностью. А.В. Брушков (1998) считал чередование слоев с разной засоленностью вообще характерным для толщ засоленных мерзлых грунтов, особенно для разрезов первичного типа.

По мнению Г.И. Дубикова (1986), установленная связь изменения в концентрации легкорастворимых солей по разрезу криогенной толщи с составом пород свидетельствует и о том, что эти изменения не подчиняются известному для талых пород закону равновесного состояния (вертикальной гидрохимической зональности), когда тяжелые растворы перемещаются вниз, а легкие вверх, в том числе и через глинистые породы. В толщах мерзлых дисперсных пород подобное струйчатое движение растворов любой концентрации, очевидно, не происходит или проявляется незначительно.

На засоленность мерзлых грунтовых толщ влияют *фациальные условия формирования слагающих их грунтов*. Грунтовые толщи, сложенные отложениями морского, аллювиально-морского, аллювиального, озерного и солифлюкционно-делювиального генезиса, засолены в разной степени с колебаниями в пределах от 0,03 до 2,1%. Засоленные мерзлые породы приурочены в основном к морским плейстоценовым и голоценовым отложениям (Дубиков, Иванова, 1990). Изначально высокая засоленность отмечена для плейстоценовых глубоководных морских глинистых отложений Печорской низменности и Ямала, а прибрежно-морские осадки засолены в меньшей степени (Данилов, 1978, 2001). На Ямале аллювиальные и озерные отложения значительно менее засолены, чем морские (Дубиков, Иванова, 1990; Инженерно-геологический мониторинг..., 1996; Полуостров Ямал, 1975; Природные условия..., 1997; Стрелецкая, 1991 и др.). По данным И.Д. Стрелецкой (1991), изучавшей закономерности пространственного изменения засоленности мерзлых пород и криопэгов на примере Бованенковского газоконденсатного месторождения, заметное засоление имеют гляциально-морские, морские и прибрежно-морские плейстоценовые осадки, в которых засоленность в глинистых грунтах достигает 0,7%, а в песках – 0,2%. Аллювиально-морские голоценовые отложения представлены, главным образом, засоленными русловыми фациями (пески – 0,4%, супеси – 0,35%). Аллювиальные голоценовые песчано-глинистые отложения слабо засолены или незасолены, засоленность песков составляет в среднем 0,03%, супесей и суглинков – 0,08%. Засоленность аллювиальных отложений может быть существенно повышена в зоне влияния морских приливов, которая составляет до 30–60 км от устья рек. Слабое засоление отмечается и в солифлюкционно-делювиальных верхнеплейстоценовых и голоценовых отложениях. При этом приповерхностный слой практически повсеместно промыт (Инженерно-геологический мониторинг..., 1996).

Геологами Московского университета (Полуостров Ямал..., 1975) и Г.И. Дубиковым (1986) показано на примере глинистых отложений Ямала и Гыдана *влияние возраста отложений на степень их засоленности* при прочих равных условиях (в частности, в случаях близкого, преимущественно глинистого состава) – некоторое уменьшение степени засоленности от более древних отложений к более молодым. Этот вывод подтверждается сравнением степени засоленности глинистых морских отложений среднеплейстоценового возраста (салехардская свита – более 1%) и верхнеплейстоценовых морских и прибрежно-морских (в среднем 0,6%). Такая же закономерность прослеживается при сравнении засоленности отложений III, II, I морских террас. Г.И. Дубиков объясняет это тем, что более древние породы в силу их большей литифицированности отличаются большей плотностью и меньшей водопроницаемостью, что и приводит

к сохранению в них большего количества легко-растворимых солей.

#### **Локальные и региональные особенности изменения степени засоленности многолетнемерзлых грунтовых толщ**

**Локальные особенности** распределения засоленности в мерзлых грунтовых толщах обычно фиксируются по вертикали разреза. Неравномерное распределение засоленности по глубине может быть седиментационным и определяться условиями образования (регрессивный характер фаций, опреснение среды осадконакопления и др.) и условиями промерзания отложений (Брушков, 1998). Неравномерная по глубине засоленность мерзлой грунтовой толщи связана прежде всего с ее типом по литологическому составу грунтов, характером соотношения в ее разрезе песчаной (менее засоленной) и глинистой (более засоленной) составляющих. Закономерное увеличение засоленности с глубиной обусловлено процессами, происходящими после формирования засоленных мерзлых пород. Они выражаются в рассолении верхнего горизонта в результате процесса миграции солей и выноса их из сезонно-талого слоя. Рассоленным может быть верхний горизонт многолетнемерзлых пород в результате протаивания, рассоления и нового промерзания.

В соответствии с вышеизложенным верхняя часть мерзлых грунтовых толщ обычно отличается меньшей засоленностью, чем мерзлые породы на глубине 5–10 м. Сезонно-талый слой грунтовой толщи из-за его сезонной промываемости пресными водами, как правило, не засолен. Увеличение засоленности с глубиной во многих разрезах прослеживается вблизи подошвы слоя нулевых годовых колебаний температуры (Брушков, 1998). Объясняют это особенностями миграции солей и влаги в зимний и летний период. Зимой поток солей направлен в основном в сезонно-талый слой, а летом происходит их быстрое и более интенсивное вымывание. В результате такого перераспределения солей происходит увеличение солености в низах грунтовых толщ на глубинах 8–12 м. В районах Центральной Якутии в условиях континентального засоления максимальное засоление пород фиксируется, наоборот, в верхних 1–5 м разреза, редко до 15 м (Еловская и др., 1966; Дубиков, Иванова, 1990).

**Общерегиональные особенности** распределения засоленности грунтовых толщ наблюдаются по простиранию. В Западной Сибири область повсеместного распространения засоленных мерзлых грунтов и криопэгов располагается севернее широты поселков Новый Порт и Усть-Порт на Енисее. В этом районе мерзлые породы засолены на всю мощность грунтовой толщи. При этом здесь нередко наблюдается чередование слоев льдистых мерзлых грунтов и талых засоленных, находящихся в охлажденном состоянии, с чередованием линз и

прослоев межмерзлотных и подмерзлотных криопэгов с более высокой концентрацией солей.

Южнее этой широты в Западной Сибири в верхнем горизонте распространены рассоленные и незасоленные морские четвертичные породы. Кровля засоленных пород расположена преимущественно глубже 50 м. Г.И. Дубиков и Н.В. Иванова (1990, с. 7) объясняют это как «большим опреснением бассейна осадконакопления, так и интенсивным воздействием процесса инфильтрации и рассоления первоначально менее засоленных отложений при их оттаивании в теплые эпохи плейстоцена и голоцена и последующем промерзании».

По данным геологов МГУ (Полуостров Ямал..., 1975), в целом для полуострова Ямал характерно увеличение солей в породах мерзлой толщи с юга на север в среднем от десятых долей процента до 1–1,5. Г.И. Дубиков (1986) также отмечал для северных районов Западно-Сибирской плиты в верхнем 15-метровом горизонте мерзлой толщи глинистого слоя уменьшение засоленности грунтов в направлении с севера на юг и вверх по разрезу. О первом свидетельствует уменьшение засоленности мерзлых пород от 1,2–0,5% на севере Ямала и Гыдана до 0,01–0,05% на Обско-Пуровском междуречье. Второе связывается с выщелачивающим воздействием пресных поверхностных вод в верхней части разреза, а в более глубоких горизонтах мерзлых пород закономерного изменения засоленности с глубиной не обнаруживается.

Для долин рек Западного Ямала отмечено (Брушков, 1998) снижение степени засоленности аллювия в направлении от устья вверх по течению. При этом тип засоления изменяется с хлоридного на хлоридно-сульфатный и гидрокарбонатный. В этой и северной частях полуострова обычно засолен аллювий низовий рек в зоне влияния морских приливов и нагонов, распространяющихся вглубь полуострова до 40 и даже 70 км (Инженерно-геологический мониторинг..., 1996). За пределами голоценового влияния моря аллювий крупных рек не засолен и не содержит криопэгов.

Засоленность мерзлых грунтовых толщ существенно меняется в зависимости от их **геоморфологической приуроченности**. Сильнее всего она изменяется на морской лаиде, в лагунах, на мелководье (Природные условия..., 1997). В.Т. Трофимов (2002) отмечал, что в прибрежных районах важно изучение степени засоленности четвертичных морских пород, слагающих лаиду, морские равнины и террасы. При этом существенное внимание необходимо уделять изучению мощности многолетнемерзлых толщ, так как на лайдах встречаются маломощные мерзлые толщи, подстилаемые охлажденными породами, насыщенными солеными водами, проявляющими высокую сульфатную и магниезиальную агрессивность к бетонам.

### О влиянии засоленности многолетнемерзлых грунтовых толщ на физико-механические свойства грунтов

Засоленность мерзлых грунтов существенно влияет, как хорошо известно, на все основные их *свойства* – теплофизические, массообменные, прочностные, деформационные и др., причем эта зависимость проявляется в грунтах разного состава и при разных температурах. Это обусловлено, в первую очередь, зависимостью содержания в них незамерзшей воды. В обзоре Ю.Я. Велли (1990) показано, что в суглинках при температуре грунта  $-2,8^{\circ}\text{C}$  с изменением засоленности от 0,15 до 1,0% количество незамерзшей воды увеличилось с 17 до 35%. Н.К. Пекарской и А.А. Чапаевым (1979) отмечено, что при засоленности суглинка 0,15% количество жидкой фазы в грунте на 6–9% больше, чем в незасоленном, а при засоленности 1,0% достигает 53%. Как следствие этого изменяются и физико-механические свойства.

Экспериментальные работы А.А. Карпуниной, А.П. Гришина, В.И. Аксенова, А.Н. Яркина и многих других исследователей показали, что физико-механические свойства мерзлых засоленных грунтов зависят и от количества содержащихся в них легкорастворимых солей, и от гранулометрического состава. Было установлено, что температура замерзания грунта, насыщенного растворами разных солей, при одной их концентрации может различаться на  $0,5\text{--}1,5^{\circ}\text{C}$ . Например, содержание в мерзлом суглинке 1% раствора NaCl изменяет количество незамерзшей воды в нем в два раза по сравнению с незасоленным суглинком. Такое же количество азотнокислого кальция ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) практически не сказывается на содержании незамерзшей воды в суглинке (Дубиков, Иванова, 1990). Засоленные мерзлые грунты могут находиться в пластично-мерзлом состоянии в значительно большем диапазоне отрицательных температур, чем незасоленные.

Повышенное содержание незамерзшей воды в многолетнемерзлых грунтах обуславливает их повышенную сжимаемость под нагрузкой за счет отжатия из пор рассола и воздуха (Велли, 1990), которая соответственно зависит от температуры и засоленности. Установлены особенности поведения засоленных грунтов под нагрузкой, которые заключаются в уменьшении их сопротивления разрушению с увеличением засоленности, а также в повышенной их деформированности по сравнению с незасоленными грунтами (Аксенов, 1980, 2008).

Изучение закономерностей изменения сопротивления мерзлых засоленных грунтов сдвигу по боковым поверхностям смерзания с фундаментом показало огромное влияние при этом степени засоленности грунта. В диапазоне температур от  $-1$  до  $-5^{\circ}\text{C}$  при засоленности до 0,5, 1,1 и 1,5% величины сопротивлений сдвигу снижались соответственно в 2–2,5 раза, в 3 раза и, в последнем случае, смер-

зание грунта с фундаментом практически отсутствовало (Велли, 1990).

А.В. Брушков (1998), изучавший состав, строение, физические и механические свойства мерзлых засоленных грунтов, отмечал низкую их структурную прочность, а величина эквивалентного сцепления (определяется шариковым штампом) в зависимости от засоленности особенно сильно изменяется в песках и супесях и меньше – в суглинках. Особенно резкое снижение прочности и увеличение деформируемости происходит у засоленных мерзлых грунтов при температурах, близких к температуре начала замерзания ( $t_{\text{нз}} - 2^\circ$ ). Это позволило А.В. Брушкову разделить засоленные мерзлые грунты на два вида по устойчивости (рис. 3) – устойчивые ( $t < (t_{\text{нз}} - 2^\circ\text{C})$ ) и неустойчивые ( $t > (t_{\text{нз}} - 2^\circ\text{C})$ ).

Такое сильное влияние засоленности многолетнемерзлых грунтов на их свойства потребовало детализации в нормативных документах задач, которые должны быть изучены при проведении инженерно-геологических изысканий. В «СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения» в разделе 6.3.3.5 указано: «При инженерно-геологических изысканиях в районах распространения засоленных грунтов следует устанавливать и дополнительно к 6.3.1.5 отражать в техническом отчете:

- распространение и условия залегания засоленных грунтов, их приуроченность к мезо- и микроформам рельефа;
- генезис, взаимосвязь степени и характера засоленности с мезо- и микрорельефом, литологическим составом и свойствами грунтов, гидрогеологическими условиями территории;
- уровень, минерализацию подземных вод и их природные и техногенные изменения;
- качественный состав и количественное содержание водорастворимых солей в грунте, их способность к растворению и выщелачиванию;

- гидрохимические условия (температура, минерализация и химический состав подземных вод, их растворяющая способность по отношению к засоленным грунтам);

- характер пространственного распределения соляных образований в грунте;

- структурные особенности грунтов, обусловленные наличием солей, включая форму, размер и размещение солей в грунте;

- наличие внешних проявлений процесса выщелачивания засоленных грунтов на земной поверхности, их формы и размеры;

- данные о современном засолении грунтов и выщелачивании солей в результате хозяйственной деятельности;

- физические, механические и химические свойства грунтов природной влажности при полном водонасыщении (в том числе растворами заданного химического состава), а также после выщелачивания солей;

- специфические свойства грунтов: степень засоленности, абсолютное суффозионное сжатие, начальное давление суффозионного сжатия, степень выщелачивания солей;

- химический состав поверхностных вод, влияющих на засоленность грунтов;

- характер деформаций существующих зданий и сооружений, вызванных выщелачиванием грунтов в их основании».

### Заключение

Выполненный обзор, основанный на обобщении опубликованных данных разных исследователей и работ сотрудников геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, убедительно показал различную по объему и содержанию изученность особенностей засоленных многолетнемерзлых грунтовых толщ. Для ряда регионов Арктики на территории России (север Печорской синеклизы и Западно-

Типы засоления по концентрации порового раствора	Морской			Континентальный
	менее 6 г/л	опресненные	слабозасоленные	
	от 6 до 12 г/л		средней солености	
	от 12 до 35 г/л		сильно засоленные	
	более 35 г/л	концентрированные		
по гранулометрическому составу	песчаные	супесчаные	суглинистые	глинистые
по льдистости (влажности)	ненасыщенные менее $0,9 W_{\text{п}}$	насыщенные более $0,9 W_{\text{п}}$	перенасыщенные более $W_{\text{п}}$	
по температуре	устойчивые менее $[t_{\text{нз}} - 2^\circ]$		неустойчивые более $[t_{\text{нз}} - 2^\circ]$	

Рис. 3. Классификация мерзлых засоленных пород по составу и состоянию, по (Брушков, 1998)

Сибирской плиты) она относительно высокая (особенно в пределах полуострова Ямал), для других существенно более низкая, в основном основанная на данных локальных работ. Все материалы, накопленные еще в советский период, были использованы в обобщающих трудах В.И. Аксенова (1980, 2008), Ю.Я. Велли (1990), Г.И. Дубикова и Н.В. Ивановой (1990), А.В. Брушкова (1998). Они заложили надежную базу для дальнейших работ.

За период, прошедший с начала XXI в., в связи с активным освоением прежде всего площадей нефтяных и газовых месторождений Арктики в ходе инженерно-геологических изысканий и более ма-

лочисленных локальных и маршрутных тематических работ накопился новый обширный материал о засоленных многолетнемерзлых грунтовых толщах, в том числе об их физико-механических свойствах. Накопились и данные мониторинга, осуществленного на многих новых функционирующих объектах. Их обобщение в монографических трудах как для отдельных крупных регионов (европейский север, Западно-Сибирская плита и т.п.), так и для всего арктического побережья России — задача, как говорят, «сегодняшнего дня».

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 17-05-00944а).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Аксенов В.И.* Исследование механических свойств мерзлых засоленных грунтов как оснований сооружений (на примере грунтов Арктического побережья). Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 1980. 23 с.
- Аксенов В.И.* Засоленные мерзлые грунты Арктического побережья как основания сооружений. М.: Изд-во «Все о мире строительства», 2008. 340 с.
- Анисимова Н.П.* Гидрохимические закономерности криолитозоны. Автореф. дисс. ... докт. геол.-минерал. наук. 1985. 35 с.
- Баулин В.В., Данилова Н.С., Суходольская Л.А.* История развития многолетнемерзлых пород на территории СССР и методы ее изучения // История развития многолетнемерзлых пород Евразии (на примере отдельных регионов). М., 1981а. С. 24–40.
- Баулин В.В., Чеховский А.Л., Суходольский С.Е.* Основные этапы развития многолетнемерзлых пород Северо-Востока Европейской части СССР и Западной Сибири // История развития многолетнемерзлых пород Евразии (на примере отдельных регионов). М., 1981б. С. 41–60.
- Брушков А.В.* Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 330 с.
- Васильчук Ю.К., Трофимов В.Т.* О находках сильно минерализованных повторно-жильных льдов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1984. № 8. С. 129–134.
- Велли Ю.Я.* Исследование вечномерзлых грунтов Арктического побережья (обзор) // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений / Ред. С.С. Вялов. М.: Наука, 1990. С. 9–20.
- Геокриология СССР. Кн. 1. Европейская территория СССР / Ред. Э.Д. Ершов. М.: Недра, 1988. 357 с.
- Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Ред. Э.Д. Ершов. М.: Недра, 1989. 413 с.
- Грунтоведение / Ред. В.Т. Трофимов. Изд. 6-е, переработ. и доп. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 1024 с.
- Грунтовые толщи Западно-Сибирской плиты / Ред. В.Т. Трофимов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 128 с.
- Данилов И.Д.* Плейстоцен морских субарктических равнин. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978а. 198 с.
- Данилов И.Д.* Полярный литогенез. М., 1978б. 238 с.
- Данилов И.Д.* Осадочное породообразование в условиях субмаринной криолитозоны // Литология и полезн. ископаемые. 2001. № 4. С. 51–65.
- Дубиков Г.И.* Закономерности распределения засоленности в мерзлых морских отложениях // Формиро-
- вание мерзлых пород и прогноз криогенных процессов. М.: Наука, 1986. С. 14–27.
- Дубиков Г.И., Иванова Н.В.* Засоленные мерзлые грунты и их распространение на территории СССР // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений / Ред. С.С. Вялов. М.: Наука, 1990. С. 3–9.
- Еловская Л.Г., Коновский А.К., Саввинов Д.Д.* Мерзлотные засоленные почвы Центральной Якутии. М.: Наука, 1966. 274 с.
- Инженерная геология России. Т. 1. Грунты России / Ред. В.Т. Трофимов, Е.А. Вознесенский, В.А. Королев. М.: КДУ, 2011. 672 с.
- Инженерная геология России. Т. 2. Инженерная геодинамика территории России / Ред. В.Т. Трофимов, Э.В. Калинин. М.: КДУ, 2013. 816 с.
- Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Т. 2. Геокриологические условия освоения Бованенковского месторождения. Тюмень, 1996. 232 с.
- Орлянский В.В.* Криогалинные воды (криопэги) на побережьях Карского и Печорского морей // Криогидрогеологические исследования / Ред. Н.П. Анисимова. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1985. С. 24–34.
- Панченко В.И., Аксенов В.И.* Физико-химический подход к классификации мерзлых грунтов по засоленности // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений / Ред. С.С. Вялов. М.: Наука, 1990. С. 70–73.
- Пекарская Н.К., Чапаев А.А.* Влияние засоленности вечномерзлых грунтов на их деформационные свойства // Инженерное мерзлотоведение. Новосибирск: Наука, 1979. С. 5–19.
- Полуостров Ямал (инженерно-геологический очерк) / Ред. В.Т. Трофимов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 278 с.
- Природные условия Байдарацкой губы: Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал-Центр / Ред. А.Р. Гептнер. М.: ГЕОС, 1997. 431 с.
- Свод правил СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах «Актуализированная редакция СНиП 2.02.04.88 (утв. приказом Министерства регионального развития РФ от 29 декабря 2011 г. № 622).
- Стрелецкая И.Д.* Закономерности пространственной изменчивости засоленных мерзлых пород и криопэгов на примере Бованенковского ГКМ. Автореф. дисс. ... канд. хим. наук. М., 1991.

Строительные нормы и правила. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. СНиП 02.04-88. Госстрой СССР. М., 1990.

*Трофимов В.Т.* Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1977. 280 с.

*Трофимов В.Т.* Зональность инженерно-геологических условий континентов Земли. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 348 с.

*Трофимов В.Т., Бадю Ю.Б., Дубиков Г.И.* Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 246 с.

**Сведения об авторах:** *Трофимов Виктор Титович* – докт. геол.-минерал. наук, профессор, зав. кафедрой инженерной и экологической геологии МГУ имени М.В. Ломоносова; *e-mail:* trofimov@geol.msu.ru; *Красилова Нина Сергеевна* – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр. кафедры инженерной и экологической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, *e-mail:* crasilova.nina@yandex.ru