

## ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК: 550.72;550.73;551.244.1;551.244.2;551.35.061;551.35.063;551.466

### НОВЫЙ ПОДХОД К ВЫДЕЛЕНИЮ ГРАНИЦ ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ПОРОД АРКТИЧЕСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

© 2021 г. Ю. В. Черняк<sup>1,\*</sup>, А. А. Фалалеева<sup>1,\*\*</sup>, А. В. Брушков<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы, д. 1, Москва, ГСП-1, 119991 Россия*

*\*E-mail: yuchernyak@mail.ru*

*\*\*E-mail: falaleeva\_arina@mail.ru*

*\*\*\*E-mail: brouchkov@hotmail.com*

Поступила в редакцию 10.05.2021 г.

После доработки 10.08.2021 г.

Принята к публикации 10.08.2021 г.

Наличие засоления мерзлых пород на тех или иных территориях Арктического побережья Северного Ледовитого океана не всегда можно объяснить воздействием морской трансгрессии (морской тип засоления) и криогенным концентрированием или концентрированием солей из-за обезвоживания пород (континентальный тип засоления). В статье представлены новые факты, которые могут объяснить образование засоления в многолетнемерзлых породах на значительных высотах над уровнем моря, и впервые приводятся возможные гипотезы образования засоленных мерзлых пород, объясняемые нагонными подъемами уровня моря и цунами в недавнем геологическом прошлом, новейшей тектоникой и биогенным засолением. Приведенные данные позволили авторам графически представить новый вариант схемы распространения мерзлых засоленных пород в северном полушарии. Граница морского типа засоления установлена по максимальной бореальной трансгрессии, граница континентального типа засоления проведена на основе анализа и сопоставления карты атмосферных осадков и испаряемости путем выделения тех участков, где испарение преобладает над осадками. Показано значительное увеличение площадей с морским и континентальным типом засоления горных пород Арктического побережья. Для высокогорных районов установлено, что уровень максимальной трансгрессии четвертичного времени не доходил до высоких отметок, к тому же климат данных участков далек от континентального.

**Ключевые слова:** *засоление, многолетнемерзлые породы, Арктика, цунами, тектоника, микроорганизмы, морская трансгрессия*

**DOI:** 10.31857/S0869780921050039

#### ВВЕДЕНИЕ

Развитие экономики России связано, в том числе, с освоением новых месторождений нефти и газа, а также других полезных ископаемых на Арктическом побережье и шельфе Северного Ледовитого океана. Строительство и эксплуатация жилых поселков, крупных транспортных объектов на распространенных в этом регионе засоленных мерзлых породах осложняет освоение Арктического побережья. Поэтому проблема уточнения образования засоленных мерзлых пород, связанная с особенностями их распространения, является актуальной [5].

В настоящее время засоленные мерзлые породы по-прежнему не охвачены должным изучением из-за их распространения в основном в труднодоступных районах и методических сложностей определения типа засоления. Тем не менее, необходимо продолжать изучение особенностей

их формирования и распространения, поскольку данные породы отличаются низкой несущей способностью и неустойчивостью к техногенным воздействиям. Эти особенности связаны с тем, что засоленные мерзлые породы занимают по многим своим свойствам положение между мерзлыми и немерзлыми породами [5].

Известны следующие способы образования засоления в многолетнемерзлых породах: воздействие морской трансгрессии (морской тип засоления) и криогенное концентрирование, а также концентрирование солей из-за обезвоживания пород (континентальный тип засоления). Причем морские условия образования преобладают над континентальными для пород четвертичного возраста, распространенных на дневной поверхности Арктического побережья. Однако этими механизмами не всегда можно объяснить наличие засоления мерзлых пород на тех или иных

территориях Арктического побережья Северного Ледовитого океана.

Обобщение сведений по распространению мерзлых засоленных пород для различных участках или всей территории Арктического побережья приведены в [5, 10, 17, 21, 23, 27]. Однако следует отметить, что фактические сведения о распространении мерзлых засоленных пород на данный момент являются неполными.

Цель настоящей работы – наряду с известными механизмами формирования засоления в многолетнемерзлых породах представить на обсуждение новые, которые, например, смогут объяснить образование засоления на значительных высотах над уровнем моря.

Перед авторами стояли следующие задачи:

1) рассмотреть последовательно каждый из возможных вариантов образования засоления в породах;

2) составить схему распространения засоленных мерзлых пород на Арктическом побережье, основанную на описанных ниже механизмах образования данных пород, с использованием имеющейся фактической информации об их наличии в различных частях Арктики, собранной российскими и зарубежными исследователями.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Г.И. Дубиков и Н.В. Иванова к мерзлым засоленным породам относят породы, содержащие легкорастворимые в воде соли [11]. Согласно ГОСТ 25100-2011<sup>1</sup>, к засоленным мерзлым грунтам (по морскому типу) относятся пески, супеси, суглинки и глины, если их засоленность (отношение веса водорастворимых солей к весу минеральных частиц в единице объема грунта) превышает соответственно значения 0.05%, 0.15%, 0.2%.

Согласно СП 25.13330.2012 “Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах”<sup>2</sup> порог значения  $D_{sal}$  (степень засоленности, %), при котором грунт можно считать засоленным меняется в зависимости от вида грунта (песок, супесь, суглинок или глина), типа засоления (морской или континентальный), а также определяемой прочностной характеристики грунта (расчетное давление под нижним концом сваи, расчетное сопротивление сдвигу по поверхности смерзания, расчетное давление под подошвой столбчатого фундамента). Также в разделе 9 приводится следующее примечание: “Пылеватые грунты мор-

ского побережья Севера с преобладанием солей натрий-калиевого состава должны относиться к засоленным при содержании в них растворимых солей от 0.05% и выше”.

В.И. Панченко и В.И. Аксенов предложили следующее определение: грунт может считаться засоленным, если содержание ионов электролитов выше обменной емкости скелета [16]. По мнению А.В. Брушкова [5], правильнее говорить о легкорастворимых солях (а не только об электролитах) в поровом растворе. Если их содержание превышает величину, при которой фиксируется изменение физико-механических свойств грунтов и которая фактически близка к обычной точности определений засоленности 0.05%, такие породы можно считать засоленными. Таким образом, авторами работы предлагается следующее определение объекта исследования: засоленными являются мерзлые породы, содержащие в поровом растворе легкорастворимые соли в количестве, составляющем более 0.05% по весу в отношении к сухой породе [5].

#### НОВЫЕ ГИПОТЕЗЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ПОРОД АРКТИЧЕСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

Механизмы формирования морского типа засоления подробно описаны в [5, 7, 10, 19, 21]. Г.И. Дубиков [10] описывает процесс перехода засоленных донных отложений в береговые мерзлые толщи. А.В. Брушков [5] по соотношению времени образования породы и времени ее засоления выделяет синхронный и эпихронный типы засоления. И.Д. Стрелецкая [19] связывает формирование криопэггов на п-ове Ямал с промерзанием морских плейстоценовых отложений сразу после их выхода из-под уровня моря.

Опираясь на описанные выше представления, можно составить следующую схему формирования засоленных мерзлых пород на Арктическом побережье. Засоление пород происходит по морскому и континентальному типам, а также под действием биогенного фактора.

Засоление по морскому типу образуется во время морской трансгрессии, либо под действием приливов, нагонных волн, цунами. Механизм формирования засоленных мерзлых пород следующий. В результате повышения уровня моря происходит затопление территорий, т.е. переход из субаэрального в субаквальное состояние пород всех генотипов, их протаивание и засоление (рис. 1а). В случае трансгрессии (повышение уровня моря на длительный время) образуется первично засоленный морской осадок. При дальнейшем понижении уровня моря и переходе в субаэральные условия с отрицательными среднегодовыми температурами прекращается засоле-

<sup>1</sup> ГОСТ 25100-2011. ГРУНТЫ. Классификация. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095052>

<sup>2</sup> СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9056423>

ние, и начинается промерзание пород (рис. 1б), что провоцирует перераспределение солей в поровом пространстве. Происходит рассоление слоя сезонного оттаивания в результате опреснения атмосферными осадками и действия процесса криогенного концентрирования (рис. 1в), а также перераспределение солей в зависимости от состава пород.

Важно, что при промерзании глинистых пород соли, как правило, двигаются вместе с потоком воды к фронту промерзания, увеличивая засоленность в промерзающей зоне. В песчаных породах, наоборот, наблюдается отжатие воды от фронта промерзания и концентрирование солей в остаточном растворе (так называемое “криогенное концентрирование”), которое может приводить к значительному накоплению солей ниже фронта промерзания и образованию криопэггов (рис. 1в) [4].

Необходимым условием континентального типа засоления является существование аридного климата на исследуемой территории, отличительной чертой которого является преобладание испарения над осадками. В результате происходит дегидратация и концентрирование солей в породе. Такие условия встречаются в Центральной Якутии, Южном Забайкалье и Монголии, однако могут встречаться и в высоких широтах, например, долине р. Маккензи и Гренландии [5, 27]. Но так как сочетание холодного и аридного климата, как правило, не может продолжаться в течение длительного времени, мерзлые толщи с континентальным засолением не имеют большой мощности. Содержание солей в них колеблется в широких пределах – от 0.05 до 2% и более. В работах [24, 25] указывается на возможность формирования в породах засоления по континентальному типу в литоральной зоне пляжа.

Следует отметить, что химические составы солей морского и континентального типов засоления различны. Для морского типа характерно сходство с составом морской воды, породы же континентального типа имеют самый различный состав солей, который определяется их взаимодействием с поверхностными, подземными водами и атмосферными осадками.

Анализ данных по распространению трансгрессий в средний и поздний неоплейстоцен [12, 20] показал, что максимальный уровень, который они достигали на побережьях Белого и Баренцева морей, составляет 100–170 м (250 м для Кольского п-ва), Карского моря – 50–80 м, морей Лаптевых и Восточно-Сибирского – 25–50 м, Чукотского моря – 12 м. Эти уровни согласуются с данными по распространению мерзлых засоленных пород и свидетельствуют о важной роли трансгрессий в формировании засоления. Однако засоленные мерзлые породы обнаружены так-

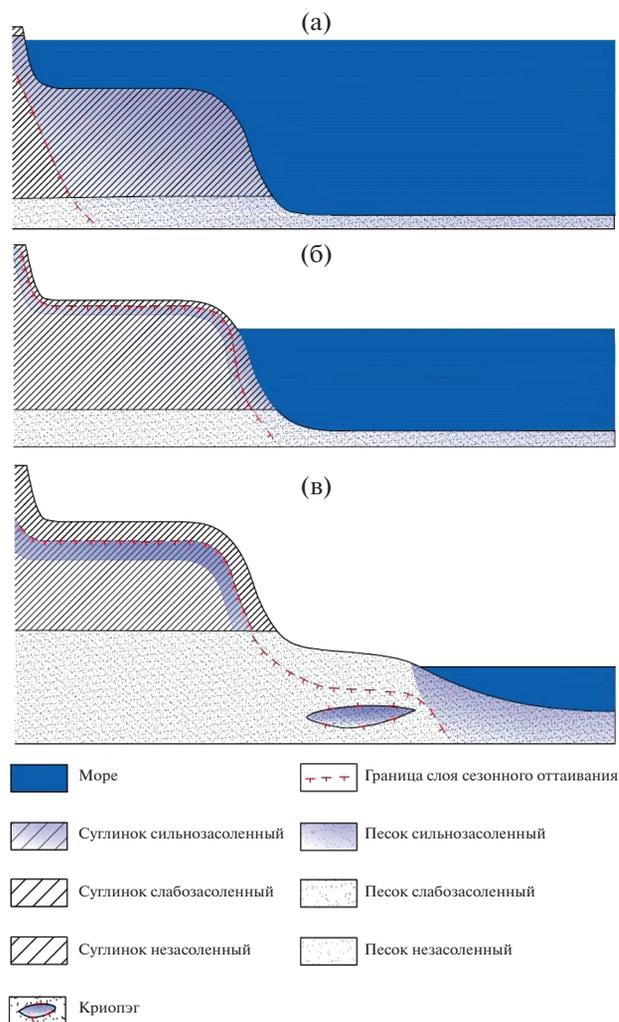


Рис. 1. Формирование засоленных мерзлых пород по морскому типу (пояснения в тексте).

же и на участках, расположенных выше отметок, которых достигали данные трансгрессии [6]. Анализ метеорологических данных позволил заключить, что климат данных территорий далек от континентального.

Появление и накопление новых фактов в научных исследованиях последних десятилетий XXI в. позволяет авторам предложить к обсуждению три новых механизма образования засоленных пород Арктического побережья.

#### Механизм 1. Нагонные подъемы уровня моря и цунами

Нагонные подъемы уровня моря, как и приливы, как правило, не превышают нескольких метров и, несмотря на очевидную возможность участия в процессах засоления береговых отложений разного генезиса, имеют ограниченное значение.

**Таблица 1.** Основные характеристики ветровых волн и волн цунами [8]

Параметры	Ветровые волны	Цунами
Скорость распространения	До 100 км/ч	До 1000 км/ч
Длина волны	До 0.5 км	До 1000 км
Период	До 20 с	До 2.5 ч
Высота волны в открытом море	До 30 м	1–2 м
Высота волны у побережья	До 40 м	До 70 м

Цунами также могли являться источником формирования засоленных пород, обнаруженных на больших высотах. Механизм возникновения цунами объясняется в литературе [8] следующим образом. Волны цунами образуются под действием относительно быстрого вытеснения масс воды в результате сеймотектонических подвижек земной коры, обвалов и оползней больших масс горных пород или донного осадочного материала, а также взрывов (извержений) на дне. Мощная водная стена цунами концентрирует в себе огромный энергетический потенциал. По мере приближения к берегу толща воды уменьшается, и, таким образом, энергия волны, идущей из эпицентра, расположенного на большой глубине, все более и более сжимается, концентрируясь во все уменьшающейся толще воды. В поверхностных водах по мере приближения к берегу, отмечается стремительный рост высоты волны. Волны, которые в открытом океане составляют в среднем 60 см в высоту, при вхождении в шельфовую зону океана теряют свою скорость, расстояние между волнами, следующими друг за другом, также сокращается, волны начинают накладываться одна на другую, что еще больше усиливает концентрацию энергии.

По данным, приведенным в табл. 1, можно сделать вывод, что высоты волн цунами значительно превышают ветровые волны и нагонные (а также приливные) подъемы уровня моря в недавнем геологическом прошлом.

Известно, что цунами большой интенсивности, характеризующиеся средним подъемом воды от 8 до 30 м, происходят приблизительно один раз в десять лет. Таким образом, вполне вероятно возникновение цунами еще большей интенсивности в течение плейстоцена, которые могли стать причиной образования засоленных пород на высотах до 70 м.

Согласно [28] экстремальные геофизические явления, такие как столкновения с астероидами и гигантские оползни, могут вызывать мегацунами с высотой волн, значительно превышающей те, которые наблюдаются при других формах цунами.

К сожалению, из-за сложных природно-климатических условий и малой населенности побережья Арктики практически отсутствуют данные

инструментальных измерений и надежные исторические свидетельства о проявлениях цунами. Анализ имеющихся геолого-геофизических материалов, а также данных о сейсмичности за период инструментальных наблюдений (1918–2015 гг.) [14] показывает, что наиболее высоким сейсмическим потенциалом в пределах арктического региона характеризуются подводный Срединно-Арктический пояс землетрясений (межплитовая граница), а также отдельные районы континентального склона – в морях Баффина и Бофорта. Для Арктического побережья России и прилегающего шельфа наибольшая опасность возникновения цунами сеймотектонического происхождения исходит от землетрясений, возникающих в зоне подводного хребта Гаккеля, являющегося восточной частью Срединно-Арктического пояса (рис. 2). В этой зоне возможно возникновение землетрясений магнитудой  $M_w \sim 6.5-7.0$  с частотой  $10^{-2}$  год<sup>-1</sup> и магнитудой  $M_w \sim 7.5$  с частотой  $10^{-3}$  год<sup>-1</sup> [14].

В [22, 26] показано, что единичное воздействие цунами приводит к засолению почв и грунтовых вод.

### *Механизм 2. Новейшая тектоника*

Предполагаемой причиной нахождения засоленных мерзлых пород на больших высотных отметках являются новейшие тектонические движения. На Арктическом побережье существуют участки, испытывающие умеренные поднятия (Кольский п-ов, п-ов Канин, о-ва Северная Земля, п-ов Таймыр, Чукотское нагорье, а также Чукотский п-ов). Существование засоленных пород на высотах, превышающих уровень максимальной трансгрессии, на этих территориях можно объяснить новейшей тектоникой.

Чтобы оценить величину именно тектонических вертикальных движений без влияния эвстатической составляющей А.В. Баранская [4] провела следующие расчеты: из высот древних береговых линий вычиталось положение абсолютного уровня Мирового Океана в момент их формирования, согласно обобщенной среднемировой кривой для голоцена. Из полученных амплитуд и времени тектонического поднятия или опуска-

ния вычислялись скорости для каждой точки. Благодаря их последующему осреднению по тектоническим областям и крупным блокам за все время с 17 тыс. лет назад, гипотетически возможные наложенные отклонения эвстатического уровня моря в Арктике от общемирового, даже если они и наблюдались, должны составлять одно и то же значение. Поэтому возможно сравнение средних скоростей вертикальных тектонических движений в разных районах Арктики.

На основе анализа карты средних скоростей вертикальных движений земной коры за последние 17 тыс. лет, приведенной в [4], можно сделать вывод о преобладающем поднятии всех областей суши. Вертикальные движения положительного знака были характерны для западной части дна моря Лаптевых (1.5 мм/год) и юга Карского моря (0.6 мм/год). Глубоководные части шельфов, напротив, испытывали погружение. Наиболее интенсивно опускалась Баренцевоморская область (–12.9 мм/год), менее активно – Карская (–9.2 мм/год) и медленнее всего – Лаптевоморская (–0.4 мм/год в центральной части и –3.8 мм/год в восточной части). В среднем, быстрее остальных структур поднимались Балтийский щит (до 8.4 мм/год, причем максимальные скорости характерны для Карельского блока), массив Земли Франца-Иосифа (4.3 мм/год), архипелаг Северная Земля (4.1 мм/год), Новосибирская область (3.9 мм/год) и Верхоянская область в районе Хараулахского хребта (3 мм/год). Ямало-Гыданская область Западно-Сибирской плиты, восточная часть Русской плиты и Таймырская складчатая область обладают схожими невысокими скоростями новейшего поднятия (1.5–2.5 мм/год), однако, судя по изменению скоростей во времени, механизмы их разные: движения Русской плиты связаны с динамикой Балтийского щита, в то время как вертикальные перемещения Западно-Сибирской плиты развиваются независимо. Наиболее стабильны в голоцене, в среднем, были Тимано-Печорская плита, мелководный шельф Ямало-Гыданской области и район дельты Яны. В целом, вертикальные движения в западной части Российской Арктики отличались контрастностью по сравнению с восточной. К примеру, разница средних скоростей вертикальных движений земной коры между соседними Балтийским щитом и Баренцевоморской областью, граничащими по системе разломов, называемой линией Карпинского, превышает 21 мм/год.

### Механизм 3. Биогенное засоление

Живые организмы существуют и развиваются в породах на поверхности твердых минеральных частиц, в поровом растворе, а также в порах, трещинах, кавернах и пустотах. Изменение состава порового раствора под влиянием жизнедеятель-

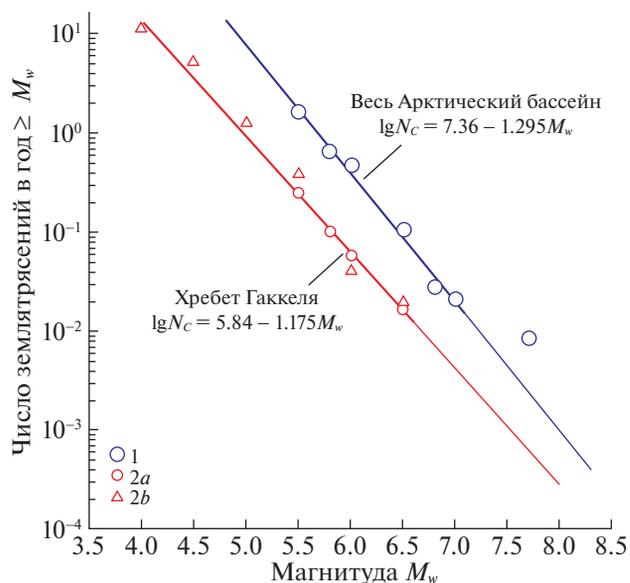
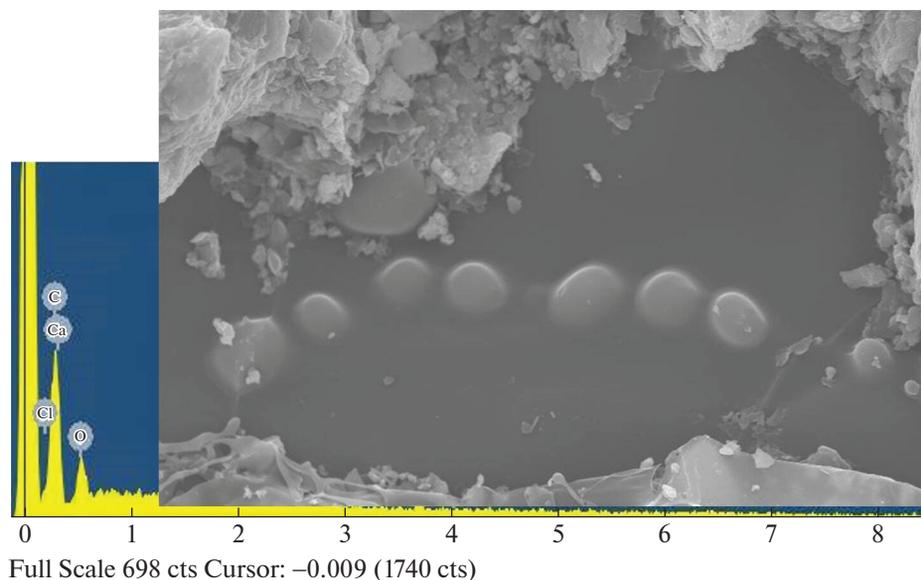


Рис. 2. Графики повторяемости землетрясений, зарегистрированных в пределах всего Арктического бассейна и подводного хребта Гаккеля [14].

ности микроорганизмов заключается в том, что растворы насыщаются различными компонентами и приобретают свойства кислот, щелочей, солей различного состава [9]. Засоленные грунты могут быть различными по химическому составу накапливающихся в них солей. Засоление вызывается накоплением хлоридов, сульфатов или карбонатов, а в некоторых случаях – нитратов. В природе засоление носит большей частью смешанный характер (сульфатно-карбонатное, хлоридно-сульфатное и т.д.) [2]. При рассмотрении вопроса о механизме возникновения солонцов и насыщения поглощающего комплекса этих почв натрием большое значение придается процессу содообразования [1].

Растения, согласно публикации [18], могут повлиять на возникновение засоления следующим образом. Для поддержания своей жизнедеятельности растениям необходимы азот и сера, которые интенсивно поглощаются из азотно- и сернокислых солей. В результате высвобождаются катионы (в том числе  $\text{Na}^+$ ), которые реагируют со свободной углекислотой и образуют карбонаты. Разложение органических остатков и круговорот минеральных элементов приводят к тому, что в ходе минерализации происходит образование солей, а выделение углекислоты при одновременном высвобождении щелочных и щелочноземельных элементов создает предпосылки для образования карбонатов, в том числе карбоната натрия.

Большая роль в содообразовании принадлежит сульфатредуцирующим бактериям. И.Н. Ан-



**Рис. 3.** Спектральный состав материала, окружающего предполагаемые клетки микроорганизмов в мерзлом неогеновом песке обнажения Мамонтова гора, Якутия. Кроме углерода, входящего в состав клеток, установлен кальций и хлор. Размер окруженных льдом клеток – несколько микрон (фото В.В. Рогова).

типов-Каратаев [1] придавал большое значение процессу сульфатредукции. В присутствии органического вещества  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , как известно, превращается в  $\text{Na}_2\text{S}$ . Сернистый натрий вступает в реакцию с имеющейся в почве углекислотой, и в результате этого образуются сода и сероводород:  $\text{Na}_2\text{S} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ .

В качестве возможных путей щелочеобразования помимо восстановления сульфатов учитывается и процесс денитрификации. В последнем случае образование карбоната натрия протекает по предполагаемой схеме  $2\text{NaNO}_3 \rightarrow 2\text{NaNO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{N}_2$  [2]. Соляные “рубашки” проф. В.В. Роговым были найдены вокруг микроорганизмов в мерзлых породах. Их происхождение пока неясно, но эти находки подтверждают связь засоления с деятельностью микроорганизмов (рис. 3).

Таким образом, содообразование следует рассматривать как биогенный процесс, обусловленный жизнедеятельностью разнообразных микроорганизмов и растений.

По мнению авторов, все три механизма могут наблюдаться в природных условиях. Возможно, что образование засоления для конкретного региона могло быть связано с действием какого-то одного из них или их совокупностью.

По данным [6] голоценовые повторно-жильные льды оз. Коолень на востоке Чукотского полуострова имеют минерализацию 35 мг/л, в составе анионов преобладает  $\text{Cl}^-$ , в составе катионов –  $\text{Na}^+$ . Авторы объясняют полученные

значения минерализации и ионного состава импульверизацией. Однако под импульверизацией понимают явления перемещения солей через атмосферу в виде твердой пыли или с атмосферными осадками. Количество же хлора в атмосферных осадках в среднем измеряется величиной 2–3 мг на 1 л. Следовательно, под действием импульверизации не могла образоваться столь высокая минерализация повторно-жильных льдов. Озеро Коолень расположено на высоте 62 м над уровнем моря. Привлекая исследования [4, 15], можно сделать вывод, что засоление не было связано с действием морских трансгрессий голоцена в комплексе с вертикальными тектоническими движениями. Таким образом, возможное объяснение засоления повторно-жильных льдов на данной территории – это воздействие цунами.

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ МЕРЗЛЫХ ЗАСОЛЕННЫХ ПОРОД В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

Районирование территории Арктического побережья проводилось на основании данных, взятых из Атласа Арктики под ред. А.Ф. Трешникова [3] (геологическая карта, карта четвертичных отложений, среднегодовое количество осадков, схема распространения морских трансгрессий в плейстоцене), карты морских трансгрессий (по С.А. Стрелкову [20]), карты испаряемости (Атлас под ред. Л.Н. Колосовой) [13]. Также использовались схема распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов в Северном полушарии по

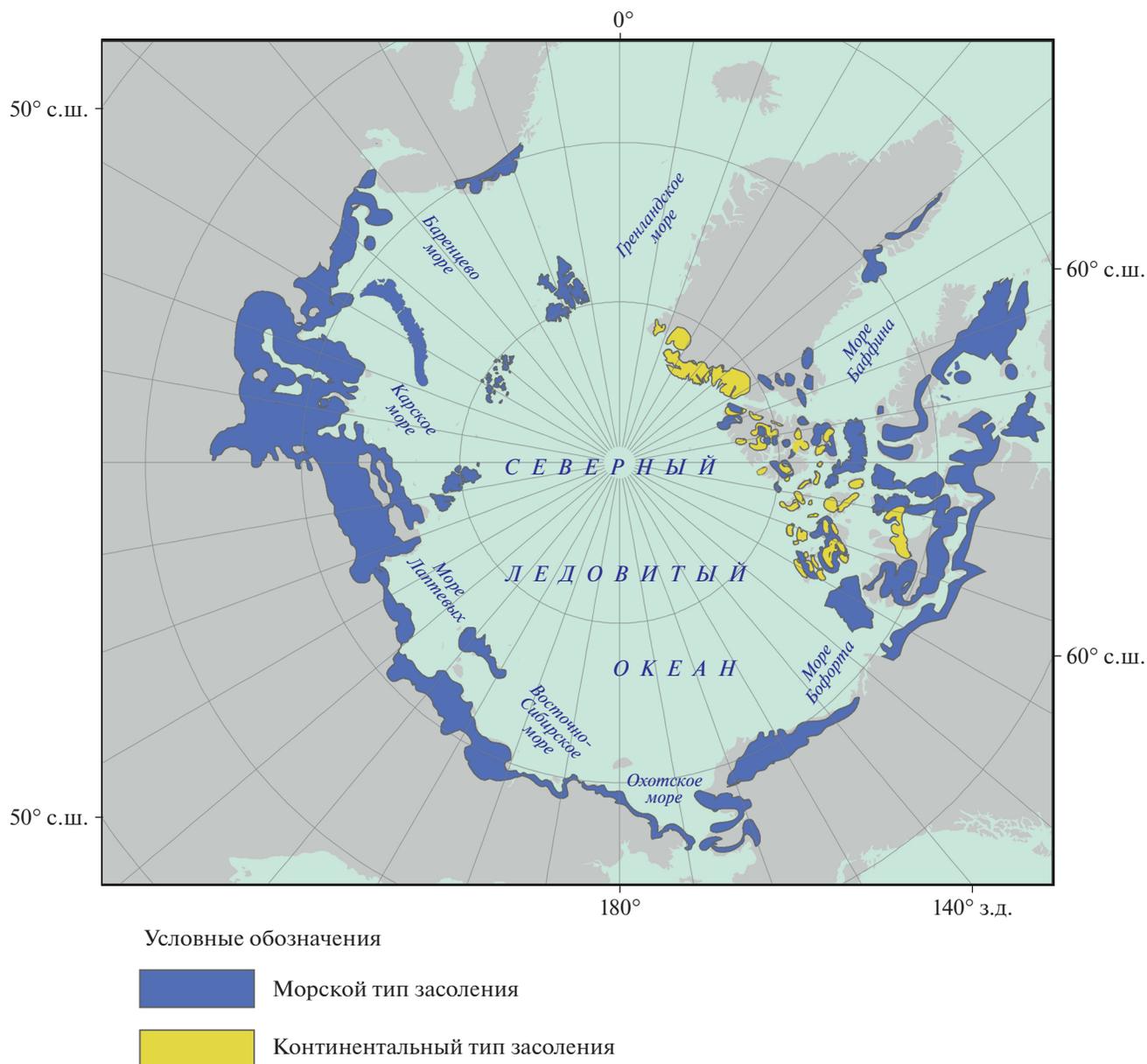


Рис. 4. Схема распространения засоленных мерзлых пород в Северном полушарии.

типам засоления (по А.В. Брушкову [5]), схема распространения мерзлых засоленных пород на полуострове Ямал [17] и схема распространения засоленных и незасоленных пород на полуостровах Ямал и Гыданский (Г.И. Дубикова и Н.В. Ивановой [11]).

Граница морского типа засоления выделена по максимальной бореальной трансгрессии микулинского межледниковья, согласно карте морских трансгрессий [20] – на территории России; карте морских трансгрессий в плейстоцене [3] – на зарубежных территориях. Выбор бореальной трансгрессии как южной границы распространения мерзлых засоленных пород обусловлен фак-

тическими данными, собранными Г.И. Дубиковым и Н.В. Ивановой [10, 11] в России и E. Nivon [25] в Канаде, об их нахождении на территориях, которые попали под влияние этой трансгрессии.

Континентальный тип засоления был выделен при сопоставлении картосхемы атмосферных осадков и испаряемости путем выделения тех участков, где испарение преобладает над осадками.

На первом этапе работы по составлению схемы была создана база пространственных данных в программном пакете ArcGis. В качестве источников картографирования использовались растровые отсканированные изображения [5, 13, 20, 3],

пространственно согласованные: для полученных растровых изображений была проведена процедура пространственной привязки в единую географическую систему координат, азимутальную проекцию. Привязка проводилась по 11–15 опорным точкам методом полиномов 3-го порядка, что давало точность привязки 300–350 м, что соответствует допустимой погрешности 0.1–0.3 мм для масштаба 1 : 2500000. Путем сопоставления растровых данных на схеме были выделены контура, соответствующие морскому и континентальному типу засоления (рис. 4).

При сопоставлении со схемой распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов в Северном полушарии по типам засоления А.В. Брушкова [5], можно сделать вывод, что полученная схема в целом ее повторяет. Но есть и заметные различия. Если проводить границы распространения засоленных пород по максимальной морской трансгрессии четвертичного времени, то их необходимо провести также в северной части Кольского полуострова. В Западной Сибири, следуя направлению бореальной трансгрессии, следует сдвинуть границы распространения засоленных пород к югу (вниз по течению рек Обь и Таз, а также в районе р. Анабар). В Восточной Сибири границы практически идентичны, совпадая с максимальной трансгрессией. Распространение засоленных пород на островах Российской Арктики совпадает со схемой А.В. Брушкова, за исключением острова Новая Земля, на котором в соответствии с картой трансгрессий [20] засоленные породы должны располагаться практически повсеместно.

В зарубежной Арктике наблюдаются следующие несовпадения: в долине р. Маккензи континентальное засоление распространено на юг несколько меньше, а в северной части Гренландии (в областях, не занятых ледником) также должен формироваться континентальный тип засоления.

В северном полушарии, согласно составленной схеме, площадь территорий с морским типом засоления составляет 246 тыс. км<sup>2</sup> (24610.9), с континентальным – 4 млн км<sup>2</sup> (4301998).

## ВЫВОДЫ

Наряду с известными способами формирования засоления в многолетнемерзлых породах представлены новые факты, которые могут объяснить образование засоления на значительных высотах над уровнем моря.

Впервые излагаются возможные гипотезы образования засоленных мерзлых пород на больших высотах над уровнем моря, объясняемые нагонными подъемами уровня моря и цунами в недавнем геологическом прошлом, новейшей тектоникой и биогенным засолением.

Примененный подход, учитывающий способы формирования засоления пород, позволил графически представить новый вариант схемы распространения мерзлых засоленных пород в Северном полушарии. Граница морского типа засоления установлена по максимальной бореальной трансгрессии, граница континентального типа засоления проведена при анализе и сопоставлении карты атмосферных осадков и испаряемости путем выделения тех участков, где испарение преобладает над осадками.

Показано значительное увеличение площадей с морским и континентальным типом засоления горных пород Арктического побережья Северного Ледовитого океана. Для высокогорных районов установлено, что уровень максимальной трансгрессии позднечетвертичного времени не доходил до таких высоких отметок, к тому же климат данных участков далек от континентального.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антипов-Каратаев И.Н.* Мелиорация солонцов в СССР. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1953. 562 с.
2. *Аристовская Т.В.* Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980. 187 с.
3. Атлас Арктики / Под ред. А.Ф. Трешникова М.: Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1985. 204 с.
4. *Баранская А.В.* Роль новейших вертикальных тектонических движений в формировании рельефа побережий Российской Арктики: автореф. дис. ... канд. географ. наук. СПб., 2015. 26 с.
5. *Брушков А.В.* Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во МГУ, 1998. 332 с.
6. *Буданцева Н.А., Васильчук Д.Ю., Маслаков А.А., Васильчук А.К., Васильчук Ю.К.* Геохимический состав голоценовых повторно-жильных льдов северо-востока Чукотки // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 34–53.
7. *Велли Ю.Я., Карпунина А.А.* Засоленные вечномерзлые грунты как основания сооружений // Тр. 2 Междунар. конф. по мерзлотоведению. Якутск: Кн. изд-во, 1973. Вып. 7. С. 49–56.
8. *Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И.* Цунами: предупреждение и защита. М.: МЧС России, 2006.
9. Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова – 6-е изд., перераб. и дополн. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
10. *Дубиков Г.И.* Закономерности формирования состава и криогенного строения мерзлых осадочных пород (на примере Западной Сибири): дис. ... доктора геол.-мин. наук / Производ. и науч.-исслед. ин-т по инж. изысканиям в строительстве. М., 1984. 468 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008690755>

11. 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.
12. Каплин П.А., Селиванов А.О. Изменения уровня морей России и развитие берегов: прошлое, настоящее, будущее. М.: ГЕОС, 1999. 299 с.
13. Колосова Л.Н. Географический атлас для учителей средней школы. М.: Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1982.
14. Куликов Е.А., Иващенко А.И., Медведев И.П., Яковенко О.И., Ковачев С.А. К вопросу о цунамиопасности арктического региона // Арктика: экология и экономика. 2016. № 3 (23). С. 38–49.
15. Макаров А.С. Колебания уровня арктических морей в голоцене: автореф. дис. д-ра геогр. наук / С.-Петербург. гос. ун-т. СПб., 2017. 45 с.
16. 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.
17. Проблемы строительства на засоленных мерзлых грунтах / Сб. научных трудов. М.: Изд-во “Эпоха”, 2007.
18. Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности Земного шара. М.: Наука, 1965. 264 с.
19. Стрелецкая И.Д. Закономерности пространственной изменчивости засоленных мерзлых пород и криопэгов на примере Бованенковского ГКМ: автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М., 1991. 25 с.
20. Стрелков С.А. Развитие береговой линии Арктических морей СССР в четвертичном периоде. Морские берега / Тр. института геологии Академии наук Эстонской ССР. 1961. Т. VIII. С. 133–146.
21. Хименков А.Н., Шешин Ю.Б. Геокриологические условия побережья Карского моря в районе пос. Амдерма // Инженерная геология. 1992. № 2. С. 71–82.
22. Azizul Moqsud M., Omine K. Bioremediation of Agricultural Land Damaged by Tsunami, Biodegradation of Hazardous and Special Products, Rolando Chamy and Francisca Rosenkranz, IntechOpen, June 14th 2013. <https://doi.org/10.5772/56595>.
23. Chernousenko G.I., Oreshnikova N.V., Ukraintseva N.G. Soil Salinization in Coastal Areas of the Arctic and Pacific Regions of Russia // Eurasian Soil Science. 2001. V. 34. № 10.
24. Geng X. et al. Evidence of salt accumulation in beach intertidal zone due to evaporation // Sci. Rep. 6. 2016.
25. Hivon E. Behaviour of saline frozen soils. Edmonton, Alberta. 1991.
26. Illangasekare T., Tyler S.W. Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka // Water resources research. 2006. V. 42. W05201. <https://doi.org/10.1029/2006WR004876>
27. Johnson R.G. Salinity of interstitial water in a sandy beach // Limnology and oceanography. 1967. V. 12. 1.
28. Paris R., Goto K., Goff J., Yanagisawa H. Advances in the study of mega-tsunamis in the geological record. Earth-Science Reviews, Elsevier, 2020, 210. P.103381.

## NEW APPROACH TO THE ELIMINATION OF BOUNDARIES OF SALINE FROZEN DEPOSITS OF THE ARCTIC COAST

Yu. V. Cherniak<sup>a,#</sup>, A. A. Falaleeva<sup>a,##</sup>, and A. V. Brouchkov<sup>a,###</sup>

<sup>a</sup> Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

<sup>#</sup>E-mail: yuchernyak@mail.ru

<sup>##</sup>E-mail: falaleeva\_arina@mail.ru

<sup>###</sup>E-mail: brouchkov@hotmail.com

Saline frozen rocks of the Arctic coast require detailed study, since these rocks are characterized by low bearing capacity and instability to technogenic impacts. Currently known methods of formation of salinity in permafrost due to the effects of marine transgression (marine salinity) and cryogenic concentration, as well as the concentration of salts due to dehydration of rocks (continental salinity), do not always make it possible to explain the presence of saline deposits on the Arctic coast of the Arctic Ocean. The purpose of this work is to present new mechanisms of salinity formation in permafrost that can explain the formation of salinization at significant altitudes above sea level. For the first time, possible hypotheses of the formation of saline frozen rocks at high altitudes above sea level are presented, due to the upsurge in sea level and tsunami in the recent geological past, the latest tectonics and biogenic salinization. The applied approach, taking into account the methods of salinization formation in rocks, allowed the authors to present graphically a new version of the map of the distribution of frozen saline rocks in the Northern Hemisphere. The boundary of the marine type of salinization was taken from the maximum boreal transgression, the boundary of the continental type of salinity was drawn by analyzing and comparing the map of atmospheric precipitation and the map of evaporation by isolating those areas where evaporation predominates over precipitation. A significant increase in the areas with marine and continental types of salinity in the Arctic coast of the Arctic Ocean is shown. For high-

altitude regions, it has been established that the level of the maximal transgression in Quaternary age did not reach such high marks, besides, the climate of these sites is far from the continental one.

**Keywords:** *salinity, permafrost, Arctic, tsunami, tectonics, microorganisms, marine transgression*

REFERENCES

1. Antipov-Karataev, I.N. *Melioratsiya solonchok v SSSR* [Reclamation of solonchaks in the USSR]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1953, 562 p. (in Russian)
2. Aristovskaya, T.V. *Mikrobiologiya protsessov pochvoobrazovaniya* [Microbiology of soil formation processes]. Leningrad, Nauka Publ., 1980, 187 p. (in Russian).
3. *Atlas Arktiki* [Atlas of the Arctic]. Treshnikov, A.F., Ed. Moscow, Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR, 1985, 204 p. (in Russian)
4. Baranskaya, A.V. *Rol' noveishikh vertikal'nykh tektonicheskikh dvizhenii v formirovaniy rel'efa poberezhii Rossiiskoi Arktiki*. [The role of the latest vertical tectonic movements in the formation of the relief of the coasts of the Russian Arctic]. Extended Abstract Cand.Sci. (Geogr.) Diss.]. St. Petersburg, 2015, 26 p. (in Russian)
5. Brushkov, A.V. *Zasolennye merzlye porody Arkticheskogo poberezh'ya, ikh proiskhozhdenie i svoystva* [Saline frozen rocks of the Arctic coast, their origin and properties]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1998, 332 p. (in Russian)
6. Budantseva, N.A., Vasil'chuk, D.Yu., Maslakov, A.A., Vasil'chuk, A.K., Vasil'chuk, Yu.K. *Geokhimicheskii sostav golotsenovykh povtorno-zhil'nykh l'dov severo-vostoka Chukotki* [Geochemical composition of Holocene ice wedges in northeastern Chukotka]. *Arktika i Antarktika*, 2017, no. 2, pp. 34–53. (in Russian)
7. Velli Yu. Ya., Karpunina A.A. *Zasolennye vechnomerzlye grunty kak osnovaniya sooruzhenii* [Saline permafrost soils as foundations of engineering structures]. *Trudy 2 Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu* [Proc. 2nd Int. Conference on Permafrost]. Yakutsk, 1973, no. 7, pp. 49–56. (in Russian)
8. Vorob'ev, Yu.L. *Tsunami: preduprezhdenie i zashchita* [Tsunami: warning and protection]. Moscow, EMERCOM of Russia Publ., 2006. (in Russian)
9. *Gruntovedenie* [Soil and Rock Engineering]. Trofimov, V.T., Ed., Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2005, 1024 p. (in Russian)
10. Dubikov, G.I. *Zakonomernosti formirovaniya sostava i kriogenno stroeniya merzlykh osadochnykh porod (na primere Zapadnoi Sibiri)* [Regularities of the formation of composition and cryogenic structure of frozen sedimentary rocks (by the example of Western Siberia)]. Doctoral (Geol.-Min.) dissertation, Moscow, PNIIS Publ., 1984. (in Russian). URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008690755>. (in Russian)
11. Dubikov, G.I., Ivanova, N.V. *Zasolennye merzlye grunty i ikh rasprostranenie na territorii SSSR* [Saline frozen soils and their distribution by the USSR territory]. In: *Zasolennye merzlye grunty kak osnovaniya sooruzhenii* [Saline frozen soils as foundations of structures]. Vyalov, S.S., Ed., Moscow, Nauka Publ., 1990. (in Russian)
12. Kaplin, P.A., Selivanov, A.O. *Izmeneniya urovnya morei Rossii i razvitie beregov: proshloe, nastoyashchee, budushchee* [Changes in the sea level in Russia and coastal development: past, present, and future]. Moscow, GEOS Publ., 1999, 299 p. (in Russian).
13. Kolosova, L.N. *Geograficheskii atlas dlya uchitelei srednei shkoly* [Geographic atlas for secondary school teachers]. Moscow, Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR, 1982. (in Russian)
14. Kulikov, E.A., Ivashchenko, A.I., Medvedev, I.P., Yakovenko, O.I., Kovachev, S.A. *K voprosu o tsunamiopasnosti arkticheskogo regiona* [About tsunami hazard in the Arctic region]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2016, no. 3 (23), pp. 38–49. (in Russian)
15. Makarov, A.S. *Kolebaniya urovnya arkticheskikh morei v golotsene*. [Fluctuations in the level of the Arctic seas in the Holocene]. Extended abstract Doctoral (Geogr.) dissertation. St. Petersburg, SPBGU Publ., 2017, 45 p. (in Russian)
16. Panchenko, V.I., Aksenov, V.I. *Fiziko-khimicheskii podkhod k klassifikatsii merzlykh gruntov po zasolennosti* [Physicochemical approach to the classification of frozen soils by salinity]. *Zasolennye merzlye grunty kak osnovaniya sooruzhenii* [Saline frozen soils as foundations of engineering structures]. Vyalov, S.S., Ed., Moscow, Nauka Publ., 1990, pp. 70–73. (in Russian)
17. *Problemy stroitel'stva na zasolennykh merzlykh gruntakh* [Problems in construction on saline frozen soils]. Moscow, Epokha Publ., 2007. (in Russian)
18. Rodin, L.E., Bazilevich, N.I. *Dinamika organicheskogo veshchestva i biologicheskii krugovorot zol'nykh elementov i azota v osnovnykh tipakh rastitel'nosti Zemnogo shara* [Dynamics of organic matter and biological circulation of ash elements and nitrogen in the main types of the Earth vegetation]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 264 p. (in Russian)
19. Streletskaya, I.D. *Zakonomernosti prostranstvennoi izmenchivosti zasolennykh merzlykh porod i kriopegov na primere Bovanenkovskogo GKM* [Regularities of spatial variability of saline frozen rocks and cryopegs on the example of the Bovanenkovskogo gas condensate field]. Extended abstract Cand. Sci. (Geol.-Min.) diss., Moscow, 1991, 25 p. (in Russian)
20. Strelkov, S.A. *Razvitie beregovoi linii Arkticheskikh morei SSSR v chetvertichnom periode* [Development of the coastline of the Arctic seas of the USSR in the Quaternary period]. *Trudy instituta geologii Akademii nauk Estonskoi SSR* [Proc. of the Institute of Geology of the Academy of Sciences of the Estonian SSR], 1961, no. VIII, pp. 133–146. (in Russian)

21. Khimenkov, A.N., Sheshin, Yu.B. *Geokriologicheskie usloviya poberezh'ya Karskogo morya v raione pos. Amderma* [Geocryological conditions of the Kara Sea coast near Amderma settlement]. *Inzhenernaya geologiya*, 1992, no. 2, pp. 71–82. (in Russian)
22. Azizul Moqsud, M., Omine, K. Bioremediation of Agricultural Land Damaged by Tsunami, Biodegradation of Hazardous and Special Products, Rolando Chamy and Francisca Rosenkranz, IntechOpen, June 14th 2013. DOI: 10.5772/56595.
23. Chernousenko, G.I., Oreshnikova, N.V., Ukraintseva, N.G. Soil Salinization in Coastal Areas of the Arctic and Pacific Regions of Russia // *Eurasian Soil Science*. 2001. V. 34. No. 10.
24. Geng, X. et al. Evidence of salt accumulation in beach intertidal zone due to evaporation // *Sci. Rep.*, 6. 2016.
25. Hivon, E. Behaviour of saline frozen soils. Edmonton, Alberta. 1991.
26. Illangasekare, T., Tyler, S.W. Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka // *Water resources research*. 2006, vol., 42, W05201, doi:10.1029/2006WR0,04876.
27. Johnson, R.G. Salinity of interstitial water in a sandy beach // *Limnology and oceanography*. 1967, vol. 12, no. 1, pp. 1–7.
28. Paris, R., Goto, K., Goff, J., Yanagisawa, H. Advances in the study of mega-tsunamis in the geological record. *Earth-Science Reviews*, Elsevier, 2020, 210, pp. 103381.