УДК 553.98:662.242.422 (268)

Я.В.НЕИЗВЕСТНОВ, *д-р геол.-минерал. наук, тел. (812)710 83 24*
С.А.КОЗЛОВ, *д-р геол.-минерал. наук, kozlov@vniio.ru*
А.В.КОНДРАТЕНКО, *старший научный сотрудник, тел. (812)710 83 24*
ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С.Грамберга», Санкт-Петербург

Ya.V.NEIZVESTNOV, *Dr. in geol. & min. sc., phone. (812)710 83 24*
S.A.KOZLOV, *Dr. in geol. & min. sc., kozlov@vniio.ru*
A.V. KONDRATENKO, *senior research assistant, phone. (812)710 83 24*
FGUP «VNIIOkeangeologia» named after I.S.Gramberg, Saint Petersburg

ИЗМЕНЧИВОСТЬ И НЕОДНОРОДНОСТЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НОВЕЙШИХ ОТЛОЖЕНИЙ ШЕЛЬФА МОРЕЙ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

С инженерно-геологических позиций раскрыты особенности структуры и физико-механических свойств донных грунтов Баренцева и Карского морей. Рассмотрены условия формирования свойств новейших отложений, их связь с неоднократным промерзанием и оттаиванием на протяжении позднего кайнозоя, особенности полярного литогенеза. Показаны региональные факторы изменчивости и особенности изменчивости физико-механических свойств поддонных грунтов с глубиной. Сделаны выводы о неоднозначности влияния историко-геологических факторов на физико-механические свойства грунтов. Показана роль грунтов, содержащих субмаринные газовые гидраты.

Ключевые слова: арктический шельф, донный грунт, изменчивость физико-механических свойств, диагенез, новейшие отложения, газовые гидраты.

VARIABILITY AND HETEROGENEITY OF THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF THE LATEST MARINE SEDIMENTS IN THE ARCTIC OCEAN

The engineering-geological position reveals the peculiarities of structure and physical-mechanical properties of bottom soil of the Barents and Kara seas. Consider the conditions for the formation of the latest sediments, their relationship with the repeated freezing and defrosting during the late Cenozoic, the peculiarities of polar lithogenesis. Regional factors of variability and features of variability of the physical-mechanical properties of bottom soil with depth are shown. Conclusions are made about the ambiguous influence of the historical-geological factors on physical-mechanical properties of soils. The role of soils, containing submarine gas hydrates, is shown.

***Key words*:** the Arctic shelf, bottom soil, the variability of the physical properties, diagenesis, latest deposits, gas hydrates.

Вопросы формирования состава и физических свойств отложений Западно-Арктических морей России рассматривались в работах многих исследователей, начиная с Ф.Нансена, Я.В.Самойлова, М.В.Кленовой; вопросами пространственной изменчивости грунтов Баренцево-Карского шельфа в разные годы занимались Я.В.Неизвестнов, И.И.Гриценко, Н.А.Полякова, В.П.Мельников, В.И.Спесивцев, С.А.Козлов и др. Н.Н.Лапиной с соавторами и И.Д.Даниловым, многие годы изучавшим донные отложения

морей Арктики, «полярный литогенез» был выделен как самостоятельный тип литогенеза, осуществлявшийся в условиях низких температур воды и высокой ледовитости бассейнов осадконакопления.

Региональные факторы изменчивости. Низкие температуры среды определяют терригенный состав осадков при почти полном отсутствии кремнистых новообразований, небольшом количестве аутигенных карбонатов, сульфидов и фосфатов железа. Ракушники отлагаются только в наиболее прогретых водах юго-западной части Баренцева моря (например, Святоносское месторождение ракушников). Специфику состава терригенных осадков определяет их ледовый разнос (до 8-2 %), в результате которого накапливаются слабосортированные мореноподобные глинистые отложения с включением обломочного материала различных размеров, классифицируемых рядом исследователей как диамиктон.

На этапе низкого стояния уровня моря в позднем кайнозое на осушенных положительных формах донного рельефа формировались континентальные льды, с которыми связано появление в разрезе шельфовых толщ собственно ледниковых и ледниково-морских отложений разнородного гранулометрического состава. После потепления климата в позднем кайнозое при малой ледовитости морей формировались более равномернозернистые тонкодисперсные отложения. Степень однородности гранулометрического состава во многом определяет физико-механические свойства грунтов. Наибольшей плотностью, до 2,25-2,34 г/см^3, и прочностью со значением неконсолидированно-недренированного сдвига (Su) до 500-800 кПа обладают ледниковые, ледниково-морские и ледово-морские отложения неоднородного гранулометрического состава, близкого к «оптимальной смеси». Наименьшими плотностью (1.30-1.60 г/см^3) и прочностью (Su – 2-10 кПа) обладают бассейновые отложения, сформировавшиеся при минимальном воздействии «ледового фактора» и характеризующиеся однородным гранулометрическим составом.

Неоднородность физико-механических свойств различных горизонтов новейших отложений усугубляется криогенезом и гидратообразованием. Баренцево-Карский шельф промерзал в субаэральных условиях на протяжении нескольких регрессий: позднемиоценовой, при понижении уровня абсолютных отметок до 400 м, среднеплиоценовой (до 350 м), раннеплейстоценовой (до 300 м), среднеплейстоценовой (до 250 м), конца позднего плейстоцена (до 140 м) [7]. Многолетнемерзлые толщи пород, сформировавшиеся до начало позднего плейстоцена, по всей видимости, полностью протаяли во время бореальной трансгрессии (с поднятием уровня моря до +80÷+100 м), начавшейся 125 и завершившейся 75 тыс. лет назад.

Последнее региональное промерзание грунтов Баренцево-Карского шельфа (включая отложения бореальной трансгрессии) произошло во время сартанской регрессии, максимальное развитие которой происходило 24-12 тыс. лет назад. Хотя максимальное понижение моря во время регрессии не превышало –140 м, в настоящее время посткриогенные породы распространены до современных глубин моря 250 м, а в Новоземельском желобе – до 430 м, что обусловлено новейшими тектоническими движениями. Деградация толщи многолетнемерзлых пород шельфа, сформировавшейся во время последней регрессии, происходила 10 тыс. лет назад, с началом голоценовой трансгрессии, когда температура грунтов под дном наступающего на сушу моря поднялась до –1.8°, а во время максимального потепления 6-8 тыс. лет назад – до 2-3°С.

Промерзанию и поддонному льдообразованию подвергалась вся толща доголоценовых отложений за исключением отложений бореальной трансгрессии, распространенных в желобах и впадинах Баренцева моря на глубинах свыше 250-300 м. Промерзание отложений, насыщенных морской водой, сопровождалось аутигенным минералообразованием с их карбонатизацией, сульфатизацией и льдовыделением [8]. По результатам наблюдений на палеошельфах Печорской низменности и Западной Сибири установлено, что при промерзании отложений, непосредственно после их выхода из-под уровня моря в результате регрессии, в верхней части промерзающих толщ, до глу-

бины 5-10 м, формируются высокольдистые породы с ячеистыми, сетчатыми и слоисто-сетчатыми криотекстурами; ниже до глубины 30-40 м сеть ледяных включений разреживается. Для промерзших толщ морских отложений характерны залежи подземных льдов в форме пластов и линз протяженностью до сотен метров, мощностью до 40-50 м [1].

Протаивание доголоценовых отложений различной льдистости во время последней трансгрессии обусловило формирование весьма разнообразных физико-механических свойств толщи. Консистенция глинистых отложений по направлению от побережья Карского и Печорского морей к шельфу изменяется от твердомерзлой и пластичномерзлой до текучей, текучепластичной, мягкопластичной, полутвердой и твердой; консистенция талых пород зависит от общей льдистости на момент протаивания.

Вероятность встречи в талых посткриогенных верхненеоплейстоценовых (и других) отложениях участков распространения мерзлых пород, содержащих пласты и линзы льда, существует во многих областях шельфа. Эта вероятность резко снижается при глубине моря свыше 140-250 м.

В юго-западной части Баренцево-Карского шельфа (напротив Кольского полуострова) прибрежная зона с глубинами до 120 м сложена талыми посткриогенными верхненеоплейстоценовыми текучими суглинками и глинами (средняя плотность 1.93-1.95 г/см^3) мощностью 50-60 м, перекрытыми маломощными современными песками. На глубине моря 320 м, в районе Штокмановской площади, под современными глинистыми илами мощностью 2 м залегает 5-метровая толща немерзлых верхненеоплейстоценовых мягкопластичных суглинков, переходящих в тугопластичные, полутвердые и твердые на глубине 27 м с плотностью 2,16 г/см^3. В зависимости от степени протаивания погруженной толщи многолетнемерзлых пород характер изменчивости толщ новейших отложений региона несколько различен близ побережий Западной Сибири, Печорской низменности, п-овов Канин и Кольского.

В целом однородность разреза и физико-механические свойства отложений различных горизонтов более благоприятны с инженерно-геологических позиций по мере удаления от суши и увеличения глубины моря, что связано с уменьшением содержания в этой толще континентальных фаций и многолетнемерзлых грунтов.

Особенности изменчивости с глубиной. Сверху вниз на Баренцево-Карском шельфе выделяются следующие инженерно-геологические комплексы [2]:

1. Современных (голоценовых) слабых и рыхлых покровных грунтов морского, аллювиально-морского, ледниково-морского, морского биогенного и элювиально-делювиально го происхождения (сейсмостратиграфический комплекс sk-3.2); средняя мощность 2-8 м.

2. Плейстоценовых мягких и рыхлых грунтов морского, ледниково-морского, флювиогляциального и аллювиально-морского происхождения (сейсмостратиграфические комплексы sk-3.1, sk-2, sk-1); средняя мощность 10-50 м.

3. Мезозойско-кайнозойских (дочетвертичных) мягких, рыхлых и полускальных грунтов; мощность, как правило, больше 100 м.

4. Палеозойских полускальных пород; мощность существенно выше 100 м.

5. Архейско-протерозойских скальных пород высокой прочности; мощность существенно выше 100 м.

Диагенез донных отложений Баренцево-Карского шельфа, определивший характер физико-механических свойств мягких и рыхлых грунтов региона, носит сложный характер, с наложением криогенных факторов.

При относительно слабом проявлении четвертичного промерзания (в основном, в западной части Баренцева моря) основной этап диагенеза (этап формирования, развития отложения – глины, суглинка) (D_2 по [3]) характеризуется постепенным развитием ближних коагуляционных контактов Кб (со средней прочностью единичного контакта 1-10 нН – преимущественно по типу «базис-скол» под небольшим углом) с замещением характерных для илов дальних коагуляционных контактов Кд (со средней прочностью единичного контакта < 0,1 нН).

Диагенез при этом проходит по «классической» схеме фильтрационной консолидации с образованием относительно прочных глинистых и суглинистых толщ.

При промерзании в плейстоцене и оттаивании в голоцене (в первую очередь – в юго-западной и восточной зонах Баренцево-Карского шельфа) криогенное воздействие, наряду с фильтрационной консолидацией в субаквальных условиях, по-видимому, является важнейшим фактором, влияющим на характер литогенеза плейстоценовых глин и суглинков. В районах с интенсивным плейстоценовым промерзанием глины, как правило, обладают существенно (на 50-70 %) более низким удельным сцеплением по отношению к непромерзавшим отложениям (около 15-20 кПа), хотя их плотность одинакова или даже несколько выше. Это объясняется разрушением, после криогенной деструкции, большинства ближних коагуляционных контактов между частицами, которые не восстанавливаются даже после посткриогенного уплотнения (вызванного усиленной фильтрационной консолидацией, за счет увеличения количества свободной воды). Промерзавшие в плейстоцене глинистые отложения по характеру структурных связей и физико-механическим свойствам близки к находящимся на раннем этапе диагенеза глинистым и суглинистым илам. Так, например, плейстоценовые «глины» Южно-Карской синеклизы (плотность 1,52-2,07 г/см^3, удельное сцепление менее 8 кПа, угол внутреннего трения близок к нулю) весьма схожи по физико-механическим свойствам с вышележащими текучими илами (1,58-1,99 г/см^3; менее 5 кПа, ноль) и определенно не могут служить надежным основанием нефтегазопромысловых сооружений.

При современном сохранении реликтового промерзания сформированы наиболее прочные (многолетнемерзлые) породы комплекса, твердомерзлой и пластичномерзлой консистенции. Их физико-механические свойства изучены крайне мало, по сути – единичные определения (в береговой зоне). На основании имеющихся данных и с использованием аналогов на суше, можно прогнозировать прочность (предел прочности при одноосном сжатии) мерзлых глин величиной свыше 1,5 МПа. Прочность мерзлых суглинков и глин – еще выше (более 3,5 и 5,5 МПа соответственно) – за счет большей льдистости, связанной с количеством свободной воды в грунте. При оттаивании морских мерзлых грунтов их прочность уменьшается более чем в 100 раз, до нескольких килопаскалей.

Характер изменчивости физико-механических свойств доголоценовых новейших отложений в зависимости от увеличения поддонной глубины залегания можно оценить по инженерно-геологическим скважинам АМИГЭ. По результатам анализа кривых изменения плотности, влажности, пористости и проницаемости пород с глубиной, приведенным в колонках скважин, можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее значительные изменения физико-механических свойств талых посткриогенных плейстоценовых отложений характерны для верхней части разреза в поддонном интервале 0-2, иногда 5-10 м. В этом слое чаще всего происходит повышение плотности грунта на 5-10 %. Например, на Ферсмановской площади (скв.48) плотность средненеоплейстоценовых суглинков, залегающих у донной поверхности, увеличилась с 1,96 г/см^3 на глубине 1 м – до 2,10 г/см^3 на глубине 3 м. На Русановской площади плотность верхненеоплейстоценовых супесей повышается с 1,70 до 1,95 г/см^3 в интервале 2-7 м (скв.162).

В отдельных случаях плотность посткриогенных плейстоценовых отложений снижается в приповерхностном слое на 10-30 %, например – с 1,95 до 1,80 г/см^3 в верхненеоплейстоценовых глинах Лудловской площади, в интервале 0.2-1 м (скв.67).

Прочность доголоценовых отложений в верхних интервалах обычно изменяется синхронно плотности. Так, в интервале 0,2-1 м по скв.67 прочность глины на сдвиг уменьшается с 10 до 1-2 кПа.

2. Глубже по разрезу новейших отложений изменение плотности, связанное с или изменением литологического состава, органического вещества или с протаиванием подземных льдов, носит волнообразный характер. Средние же значения плотности по разрезу, начиная с глубин порядка 10 м,

для грунтов одного литологического состава остаются примерно постоянными в большинстве случаев.

Региональная изменчивость состава и физико-механических свойств голоценовых осадков последней трансгрессии в целом определяется современными вертикальной (батиметрической), циркумконтинентальной (в данном случае – удалением от суши) и в меньшей степени широтной зональностями осадконакопления, несколько нарушенными ледовым разносом [4]. Крупнообломочные и песчаные грунты на шельфе распространены вдоль побережий до изобат: на Баренцевоморском и Печорском шельфах 200-100 м, на Карскоморском шельфе 50-20 м, в губах и заливах до 20-10 м.

За пределами глубин распространения прибрежных галечников и песков распространены глинистые осадки, в основном – илы глинистые и суглинистые. На закономерностях изменчивости их состава и свойств более всего отражается батиметрическая зональность, выражающаяся в снижении их прочности от 6 до 1 кПа на глубинах моря 100-300 м с градиентом 1,7-3 кПа/100 м.

С увеличением глубины поддонного залегания влажность голоценовых осадков уменьшается, а плотность увеличивается, иногда в маломощных слоях оставаясь постоянными.

Прочность современных грунтов с глубиной обычно несколько увеличивается или же остается постоянной. Тогда как, например, в северо-восточной части Баренцево-Карского шельфа по результатам испытаний донных осадков через 5 см по грунтовым колонкам длиной 20-95 см зависимость плотности и прочности грунтов от поддонной глубины не прослеживается. На западной периферии шельфа наиболее слабые осадки с прочностью на сдвиг менее 2 кПа залегают на глубине 0,5 м, глубже их прочность увеличивается с градиентом 3,5 кПа/м [5].

Отдельную инженерно-геологическую проблему, связанную с историко-геологическими особенностями формирования региона, могут представлять поддонные грунты, содержащие газовые гидраты. На настоящий момент остается фактом то, что из недр Баренцево-Карского шельфа не добыто ни одного образца газовых гидратов. Тем не менее, ряд исследователей считает, что в криолитозоне арктических шельфов возможно присутствие газовых гидратов. В.Н.Бондаревым с соавторами еще в 1990 г. составлена схема геокриологического районирования и зон возможного гидратообразования на Баренцево-Карском шельфе. Авторы статьи [6] утверждают, что под многолетнемерзлыми породами чехла нефтегазовых бассейнов полярных шельфов повсеместно присутствует сплошная зона пород, сцементированных газовыми гидратами («горячая мерзлота» по терминологии канадских коллег) мощностью в несколько сотен метров.

Заключение

Таким образом, наиболее существенную роль в формировании физико-механических свойств новейших отложений арктического шельфа России сыграли криогенез, на этапах его субаэрального развития, во время регрессий моря, посткриогенные процессы, во время морских трансгрессий, и процессы гидратообразования, по-видимому, протекающие синхронно с промерзанием и оттаиванием шельфа.

На этапах регрессии шельфовых морей в отложениях, вышедших из-под уровня моря, формировалась толща многолетнемерзлых пород (мощностью до 500-600 м), включающая подземные льды и соли, осаждающиеся при промерзании морской воды.

Во время трансгрессий моря толща многолетнемерзлых пород (ММП) полностью или частично деградировала с сохранением реликтов преимущественно островного типа. Талые породы заметно изменили свои свойства. В верхней части геологического разреза формировались слабые донные осадки (илы) нередко со значительным включением обломочного материала. Газовые гидраты, образовавшиеся под толщей ММП, цементируя рыхлые отложения в зоне своей стабильности, на глубинах до 900 и более метров, образовали на значительной части площади нефтегазовых бассейнов

арктического шельфа зону квазимерзлых пород, что еще более увеличило неоднородность новейших отложений и усложнило инженерно-геологические условия строительства скважин на нефть и газ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Данилов И.Д.* Процесс осадочного породообразования в криолитозоне // ГЕОЭКОЛОГИЯ. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1995. № 4, С.28-43.

2. *Козлов С.А.* Инженерно-геологическая стратификация Западно-Арктической нефтегазоносной провинции // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», http://www.ogbus.ru/authors/Kozlov/Kozlov_3.pdf. Опубликовано: Уфа, 2005. 24 с.

3. *Козлов С.А.* Роль позднекайнозойского промерзания в диагенезе донных отложений Баренцево-Карского шельфа // ГЕОЭКОЛОГИЯ. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2006. № 1, С.72-83.

4. *Козлов С.А., Неизвестнов Я.В.* Пространственная изменчивость физико-механических свойств донных отложений нефтегазоносной области Баренцево-Карского шельфа // Труды НИИГА-ВНИИОкеангеология, СПб, 2003. Т. 198. С.79-85.

5. *Кондратенко А.В., Козлов С.А.* Физико-механические свойства верхнеплейстоцен-голоценовых отложений материкового склона вдоль западной окраины Баренцева моря // Инженерно-геологические условия разработки полезных ископаемых морского дна. СПб, 1996. С.73-82.

6. Мерзлотно-геотермические проблемы освоения нефтегазовых ресурсов Российской Арктики. Авторы: Я.В.Неизвестнов, О.И.Супруненко, О.В.Боровик, Н.Л.Колчина, Н.А.Куринный, Т.Н.Францева // Проблемы Арктики и Антарктики, 2009. №2 (82). С.50-59.

7. *Неизвестнов Я.В., Зархидзе В.С., Мусатов Е.Е.* Эволюция мерзлотных условий Баренцево-Карского шельфа в позднем кайнозое // Тез. докл. юбилейного годичного собр. Науч. совета по криологии Земли. Пущино, 1995. С.24-25.

8. Основные проблемы палеогеографии позднего кайнозоя Арктики. Л., 1983. 263 с.

REFERENCES

1. *Danilov I.D.* The process of diagenesis in the permafrost zone // GEOECOLOGY. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology. 1995. № 4, P.28-43.

2. *Kozlov S.A.* The engineering-geological stratification of the West-Arctic oil and gas province // Electronic scientific journal «Oil and Gas business», http://www.ogbus.ru/authors/Kozlov/Kozlov_3.pdf. Posted: Ufa, 2005. 24 p.

3. *Kozlov S.A.* The role of the Cenozoic freezing in diagenesis of the bottom sediments of the Barents-Kara shelf // GEOECOLOGY. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology. 2006. № 1. P.72-83.

4. *Kozlov S.A., Neizvestnov Ya.V.* Spatial variability of physical-mechanical properties of bottom sediments of the oil-and-gas region of the Barents-Kara shelf // Offshore engineering and geological studies. Saint Petersburg, 2003. P. 79-85.

5. *Kondratenko A.V., Kozlov S.A.* The physico-mechanical characteristics of upper Pleistocene-Holocene sediments of continental slope along the Western edge of the Barents sea // Engineering-geological conditions of development of mineral resources of the sea bottom. Saint Petersburg, 1996. P.73-82.

6. Permafrost-geothermal problems of development of oil and gas resources in Russian Arctic / Neizvestnov Ya.V., Suprunenko O.I., Borovik O.V., Kolchina N.L., Kurinniy N.A., Franceva T.N. // The problems of Arctic and Antarctic. 2009. № 2 (82). P.50-59.

7. *Neizvestnov Ya.V., Zarhidze V.S., Musatov E.E.* The evolution of permafrost conditions of the Barents-Kara shelf in the late Cenozoic // Theses of reports of the jubilee meeting of the scientific Council on Earth Cryology. Puschino, 1995. P.24-25.

8. The main problems of paleogeography of the late Cenozoic of the Arctic. Ltningrad, 1983. 263 p.