

doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-226-237



СТРАТИГРАФИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДОННЫХ ГРУНТОВ АКВАТОРИАЛЬНОЙ ЧАСТИ ПЛОЩАДИ САЛМАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРНАЯ ЧАСТЬ ОБСКОЙ ГУБЫ)

✉ Рокос С.И.¹, Костин Д.А.², Гайнанов В.Г.³, Куликов С.Н.¹, Скурихин В.А.¹

¹АО «Арктические Морские Инженерно-Геологические Экспедиции», Мурманск, Россия

²Мурманский Арктический Университет, Мурманск, Россия

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ RokosSI@rusgeology.ru

В результате инженерно-геологических изысканий, выполненных на акваториальной части площади Салмановского месторождения было установлено, что большей своей частью она располагается на древнеголоценовой морской абразионно-аккумулятивной террасе. В верхнем интервале грунтовой толщи до глубины 50-60 м от дна здесь выделены отложения казанского и каргинского горизонтов, а также древнеголоценовые и современные отложения. Древнеголоценовые отложения переуплотнены (коэффициент переуплотнения более 2) и имеют твердую-тугопластичную консистенцию. Подстилающие их одновозрастные и каргинские образования отличаются текучей-текучепластичной консистенцией. Распределение свойств по разрезам скважин носит инверсионный характер, обусловленный изменчивостью условий седиментации и диагенеза.

Ключевые слова: *Обская губа, Салмановское месторождение, четвертичные отложения, донные грунты, абсолютный возраст, физико-механические свойства, коэффициент переуплотнения*

Площадь Салмановского (Утреннего) месторождения расположена на северо-западе Гыданского п-ва у побережья Обской губы. В 2014 г. в акваториальной части этой площади были проведены комплексные инженерно-геологические изыскания силами АО «Арктические Морские Инженерно-Геологические Экспедиции» (АМИГЭ) и ООО «Центр Анализа Сейсмических Данных МГУ им. М.В. Ломоносова» (ЦСАД МГУ) для постановки завода по сжижению газа в рамках проекта «Арктик-СПГ-2». В составе этих изысканий АМИГЭ выполнены инженерно-геологическое бурение, лабораторные определения состава и свойств донных грунтов и статическое зондирование. Сейсморазведка высокого разрешения (СВР) выполнялась ЦАСД МГУ.

Изыскания были проведены на двух альтернативных площадках Т1 и Т2 (рис. 1). В ходе выполнения буровых работ площадка Т1 была признана не благоприятной. Здесь была пробурена лишь одна скважина глубиной 60 м от дна. Основной объем бурения и статического зондирования был выполнен на площадке Т2, где выполнено 5 скважин максимальной глубиной 50 м от дна и 5 точек статического зондирования. При этом точки зондирования размещались вблизи устьев инженерно-геологических скважин. Максимальное внедрение зонда составило около 9.5 м ниже дна (точка вблизи устья скважины №4).

Методика исследований. Инженерно-геологическое бурение и проведено с борта научно-исследовательского судна (НИС) «Кимберлит» (судовладелец АМИГЭ). Керн отбирался съемным пробоотборником 89/85 мм (Atlas Copco, Швеция) и гидроударным пробоотборником ПГС-132 (АМИГЭ) диаметром 132/99 мм.

Статическое зондирование проведено также с борта НИС «Кимберлит» с помощью донной установки производства AP van den Berg (Нидерланды) «Roson 40KN» с колесным электро-механическим приводом (wheeldrive) и колонной пенетрационных труб диаметром 36мм. Измерительным зонд С10CFP (II-го типа) оснащен внутренним модулем памяти. Усилие внедрения конуса- 40 КН. Измеряемые параметры: сопротивление грунта под конусом (лобовое сопротивление), трение по участку боковой поверхности (боковое

трение) и избыточное поровое давление. Вдавливание зонда производилось непрерывно от поверхности дна до глубины отказа.

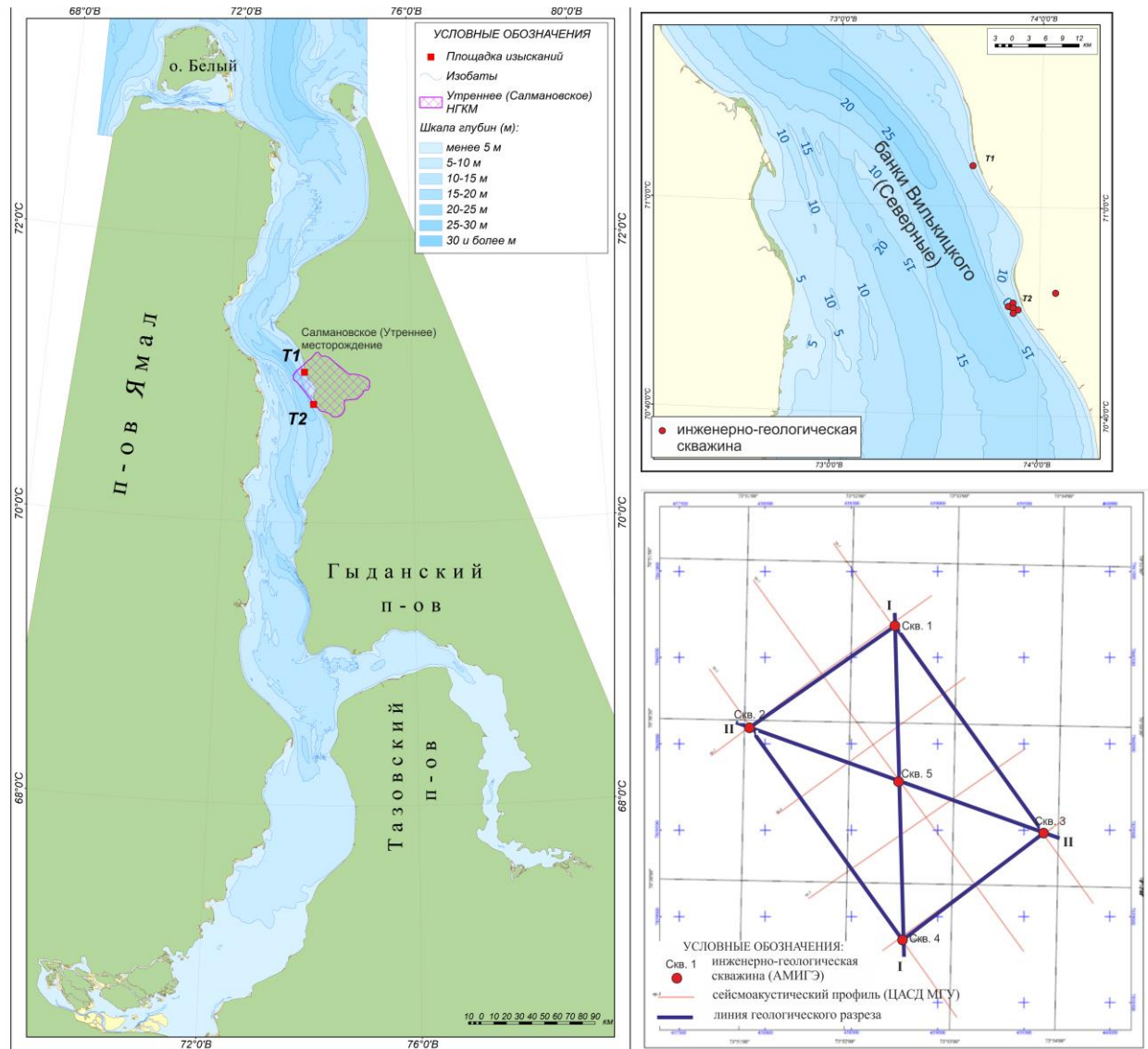


Рис. 1. Местоположение площадок Т1 и Т2 в акватории Обской губы (слева), взаиморасположение скважин (справа-вверху) и схема работ на площадке Т2 (справа-внизу)

Лабораторные исследования кернового материала выполнялись в соответствии с действовавшими в то время государственными стандартами РФ. Кроме того, были проведены определения сопротивления недренированному сдвигу (undrained shear strength) с помощью ручной крыльчатки (VJ Tech, стандарт BS 5930), ручного пенетromетра (Controls, model 16-T0171, стандарт BS 5930), лабораторной крыльчаткой (Wykeham Farrance 27, model WF1730, стандарт ASTM D 4678).

Также были выполнены определения абсолютного возраста вскрытых бурением четвертичных отложений. Эти определения выполнялись в лаборатории ООО «Геологический центр СПбГУ» (заключение Арсланова Х.А.). Было выполнено 7 определений радиоуглеродного возраста, которые затем пересчитаны в значения калиброванного календарного возраста.

Работы СВР Работы производилась с борта арендованного речного буксира. Заборная аппаратура буксировалась с помощью небольшого катамаран, излучатель-бумер крепился под катамараном на глубине 20 см, коса 16 канальная длиной 30 м буксировалась наклонно - начало крепилось к катамарану на глубине 20 см, затем глубина

постепенно увеличивалось до 60-80 см к концу. Такое распределение глубине приемников позволило при последующем суммировании по общей глубинной точке существенно подавить волны-спутники и получить высокую разрешенность записей, а при интерпретации выделить тонкую слоистость осадков.

Батиметрия и геоморфология. На батиметрических картах местоположение площадок Т1 и Т2 приурочено к вытягивающейся вдоль гыданского побережья абразионно-аккумулятивной террасе. Поверхность террасы шириной от менее 0.1 до 5.0 км и более расположена в диапазоне глубин моря от 10-12 до 5-7 м (рис. 2). Ее бровка прослеживается между изобатами 11-13 м. Подножие переходит морскую преимущественно аккумулятивную равнину на глубинах около 20-21 м. Склон террасы имеет ширину около 0.5 км. Тыловой шов проходит по подножию относительно крутого прибрежного склона.

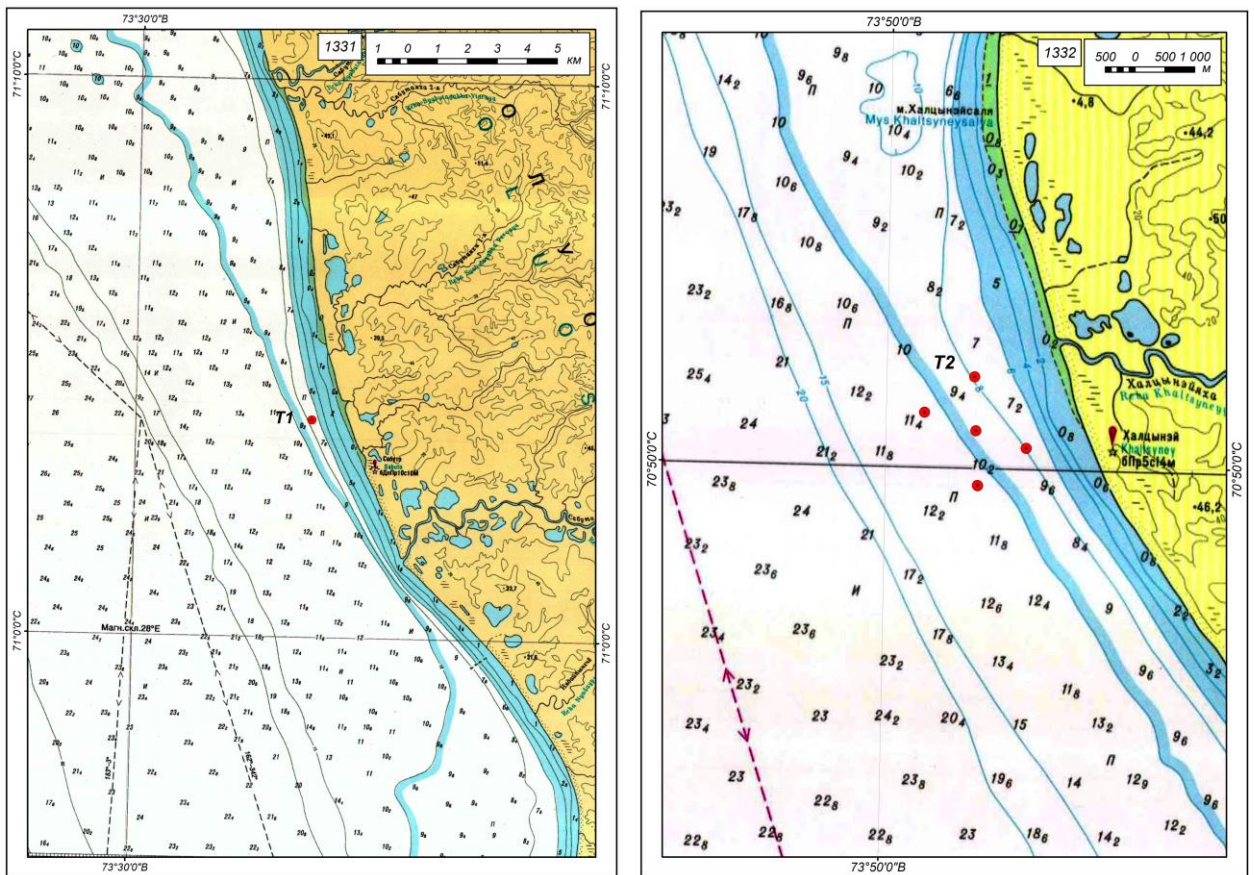


Рис. 2. Батиметрия района работ и местоположение скважин на картах Северного Морского Пути, выкопировки с карт №№№1331 (слева) и 1332 (справа). Скважины обозначены красными кружками.

Результаты сейсморазведки высокого разрешения. В районе работ развитые под поверхностью древнеголоценовой террасы осадки практически повсеместно насыщены свободным посткриогенным и биогенным газом [Рокос, Тарасов, 2007]. Это не позволяет проследить структуру осадочной толщи и выделить отражающие горизонты на большей части площади изученных участков.

Исключение составляет лишь района склона террасы и примыкающая область морской аккумулятивной равнины. Данная область приурочена к протяженному «акустическому окну», выделяемому среди газонасыщенных отложений Обской губы. В пределах данной области нами выделено четыре сейсмостратиграфических комплекса (ССК) (рис. 3, 4, 5):

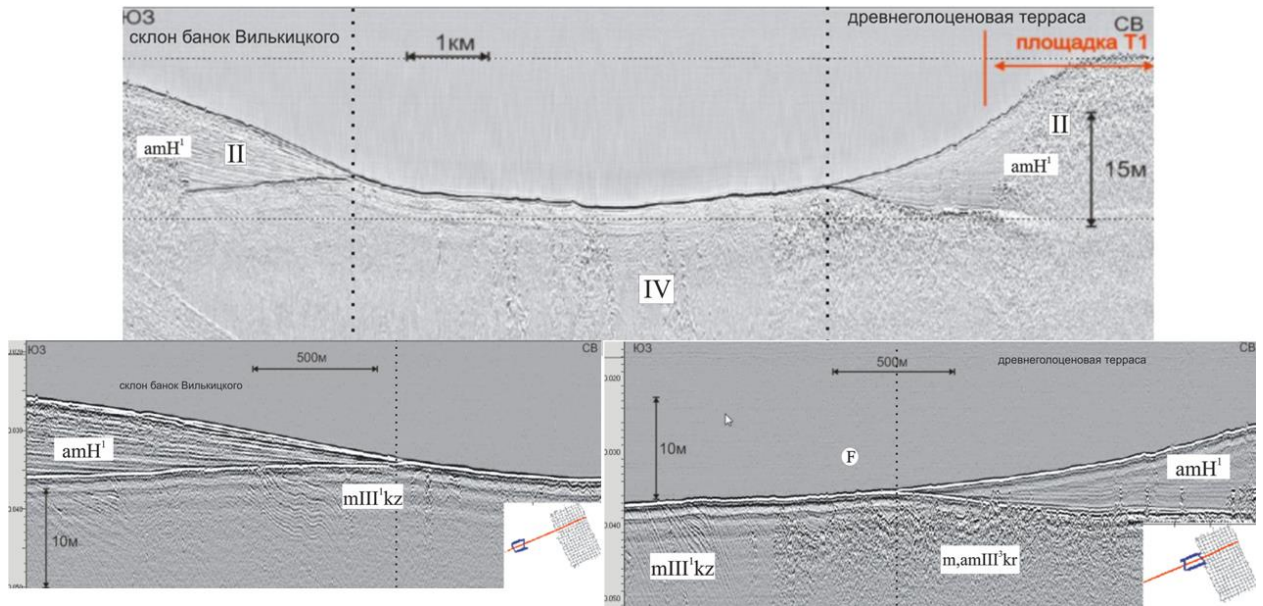


Рис. 3. Временной разрез СВР от западного склона банок Вилькицкого к побережью в районе площадки Т1. Отчетливо наблюдается акустическая слоистость в толще комплекса ССК-II на склоне банок Вилькицкого. В районе площадки Т1 в пределах древнеголоценовой террасы слоистость менее четкая.

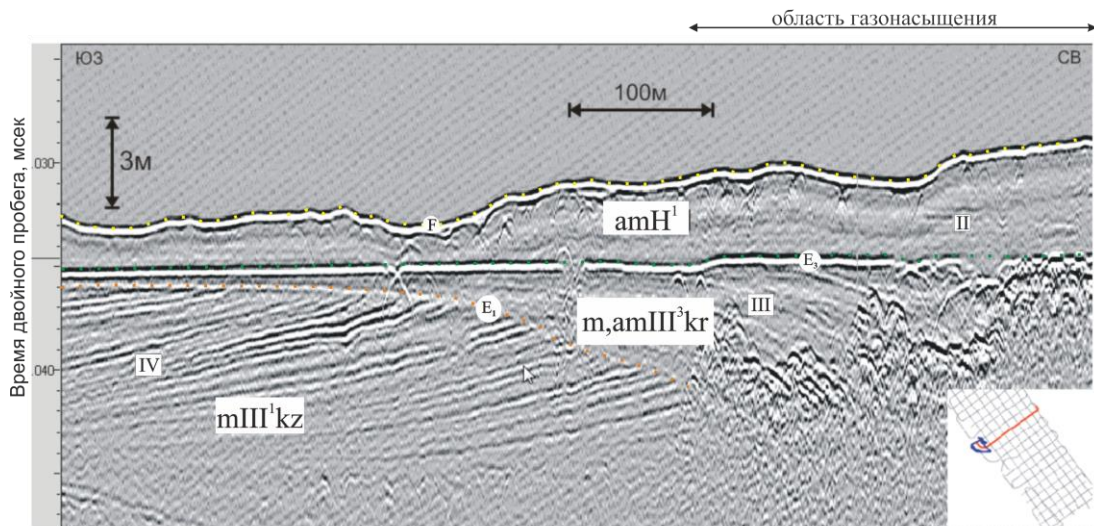


Рис. 4. Временной разрез СВР, полученный в районе подножия древнеголоценовой террасы. Отчетливо прослеживается слоистая структура и несогласие между ССК-IV и ССК-III. Наблюдается четкое выклинивание толщи ССК-III в мористом направлении с СВ на ЮЗ. Рельеф кровли комплекса ССК-II неровный достаточно расчлененный.

- ССК-IV развит в основании изученного сейсмическими методами интервала. Глубина залегания его подошвы осталась не установленной. На временных разрезах от прослеживается в виде акустически слоистой толщи. Слоистая структура сложная, местами имеет облик складчатой. Кровля данных образований перекрывается вышележащими с четковыраженным угловым и эрозионным несогласием.

- ССК-III прослеживается в виде выклинивающегося в западном мористом направлении тела, напоминающего своей формой в разрезе козырек. Эта толща также имеет акустически слоистую структуру.

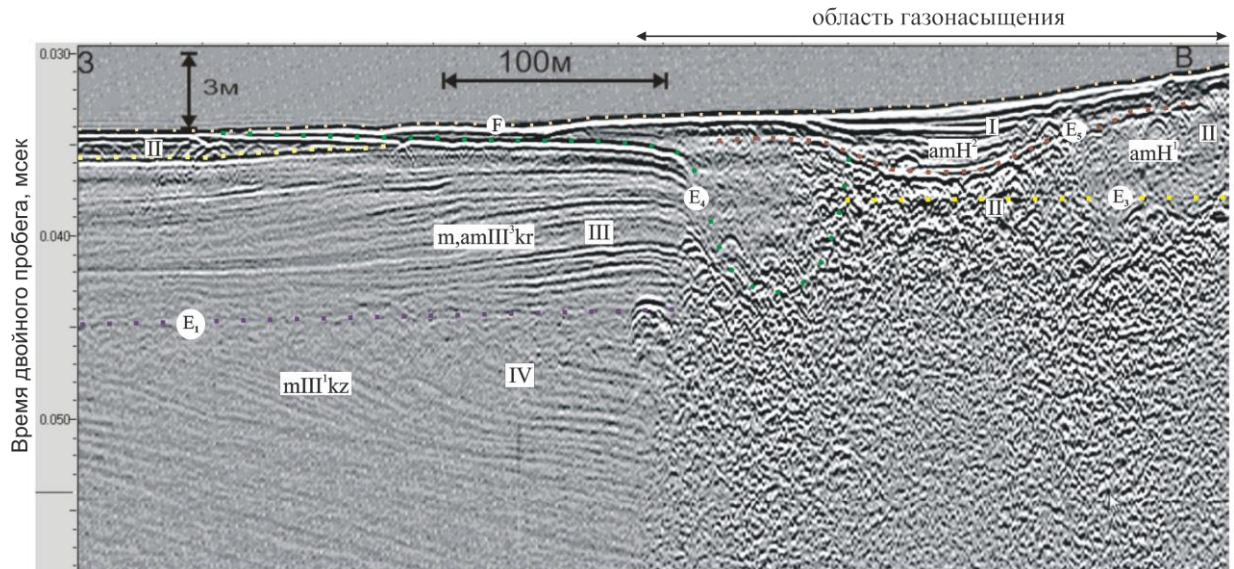


Рис. 5. Временной разрез СВР, полученный в районе подножия древнеголоценовой террасы. Отчетливо прослеживается слоистая структура ССК-IV и ССК-III. Наблюдается резкая латеральная граница области газонасыщения. В палеодепрессиях выделяется ССК-I.

- ССК-II слагает основной объем отложений древнеголоценовой террасы и имеет мощность до 15 м и более. В мористой части акватории, в границах аккумулятивной морской равнины он выклинивается и развит в виде тонкого покрова мощностью на более 5 м. Кровля данного комплекса сильно изрезана бороздами ледового выпаживания, что придает ей ложный облик эрозионной границы. Внутри комплекса местами прослеживается весьма нечеткая акустическая слоистость.

- ССК-I залегает первым от поверхности дна. На большей части площади участков изысканий его мощность менее 1-2 м, что ниже разрешающей способности примененной модификации сейсморазведки. Это не позволило уверенно проследить подошву и внутреннюю структуру данного комплекса по всей площади изысканий. Достаточно уверенно данные образования выделяются лишь в пределах локальных палеодепрессий, где их мощность может достигать 3-5 м.

Кроме того, в прилегающих к площадкам районах под подошвой ССК-I и ССК-II также выделены эрозионные палеоврезы, полностью компенсированные акустически слоистыми образованиями. В границах изученных площадок такие врезы достоверно не установлены.

Результаты бурения. Инженерно-геологическим бурением толща осадков была вскрыта до глубины 60 м от дна на площадке Т1 и до 50 м на площадке Т2 (рис. 6, 7, 8). Развитая в указанном интервале осадочная толща весьма неоднородна по своему составу и представлена чередованием глинистых, суглинистых, супесчаных и песчаных слоев. В верхней части толщи преобладают связанные слоистые глинистые грунты. На глубинах более 19.0-36.5 м от дна развиты исключительно пески. Пески во всех слоях достаточно однородные в основном не слоистые и характеризуются мелко-пылеватым составом.

По всей толще отмечаются включения раковин, торфа и растительных остатков, а также многочисленные линзы, гнезда и тонкие прослои насыщенные черным гидротроилитом. В глинистых образованиях гидротроилит встречается значительно чаще, чем в песках. Исключение составляет первый от поверхности дна песчаный слой местами интенсивно насыщенный гидротроилитом, что придает ему темно-серый до черного цвет.

Результаты определений физико-механических свойств по данным лабораторных испытаний и статического зондирования показывают, что песчаные грунты весьма однородны и имеют повсеместно рыхлое-среднеплотное сложение. Пески различных слоев слабо отличаются друг от друга. При вскрытии скважинами пески проявляют свойства пльвунов.

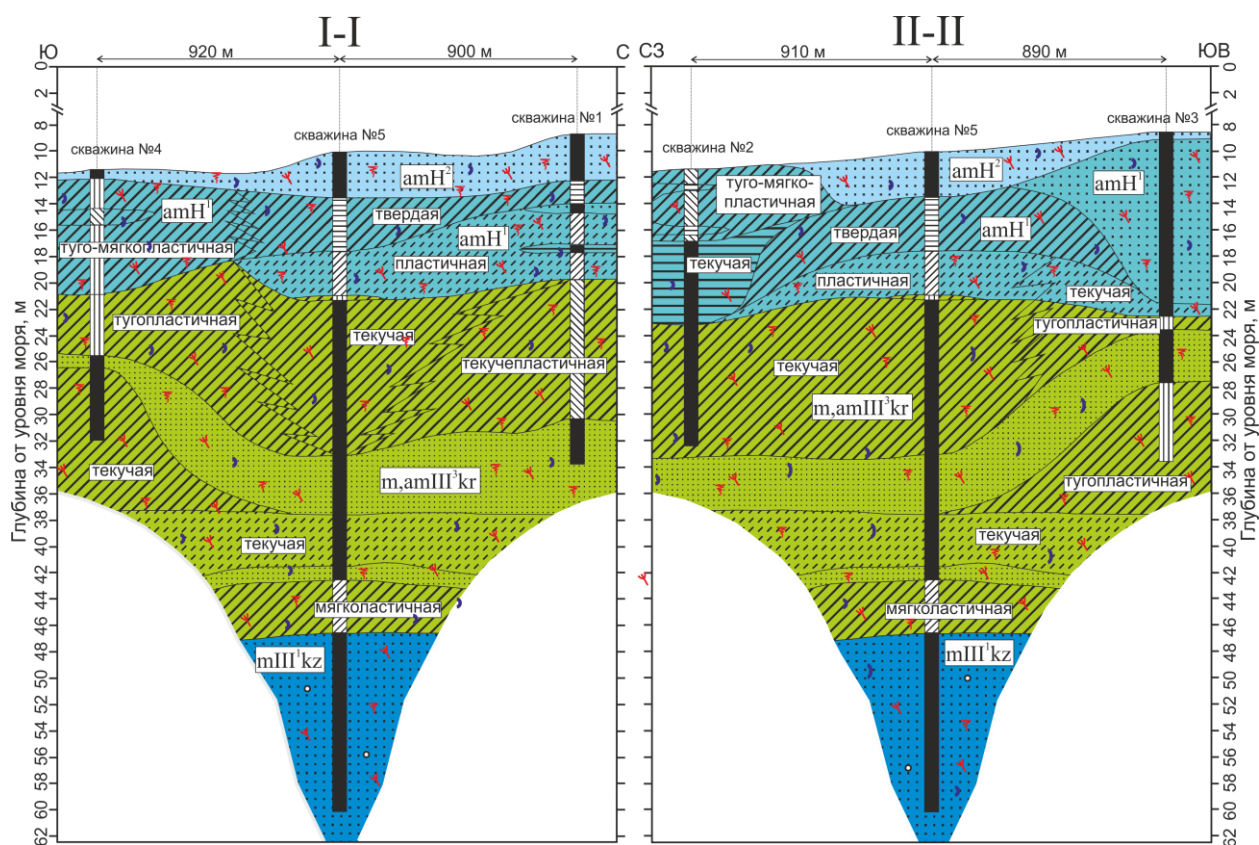


Рис. 8. Диагональные разрезы через площадку Т2.
Местоположение скважин см. на Рис.1, условные обозначения на Рис. 7

Степень консолидации может быть выражена через показатель текучести и прочность. Очевидно, что чем выше прочность и ниже текучесть грунтов, тем выше их степень консолидации. При этом прочность интегрально оценивается по значениям сопротивления недренированному сдвигу.

В составе глинистых грунтов выделяются относительно высоко консолидированные разновидности твердой консистенции, среднеконсолидированные мягко-тугопластичные суглинки и пластичные супеси, а также неконсолидированные суглинки и глины текучей-текучепластичной консистенции и текучие супеси. В верхней части разреза преобладают относительно высоко консолидированные суглинки твердой консистенции. Эти образования перекрывают среднеконсолидированные и неконсолидированные грунты. Также отмечаются достаточно резкие замещения по латерали среднеконсолидированных отложений неконсолидированными.

Неконсолидированные глинистые грунты залегают в пределах площадок на значительной глубине, превышающей 20-25 м от дна.

На полученных нами графиках изменение свойств по разрезу носит в основном безградиентный характер (рис. 9, 10). В отдельных интервалах наблюдается инверсия свойств, выраженная в снижении плотности и прочности вниз по разрезу при параллельном увеличении текучести и пористости.

Степень соответствия свойств современному бытовому или горному давлению, оценена посредством коэффициента переуплотнения (КПУ) или overconsolidation ratio (OCR), рассчитанного по данным статического зондирования в точке около скважины №4 (рис. 11). Этот коэффициент представляет собой отношение современного бытового или горного давления (напряжений в скелете, вызванных собственным весом грунта) к максимальному давлению, имевшему место за время после завершения седиментации. Его значения по разрезу указанной скважины превышает 2 и достигает в прикровельной части значений более 4, что говорит о переуплотненном состоянии грунта.

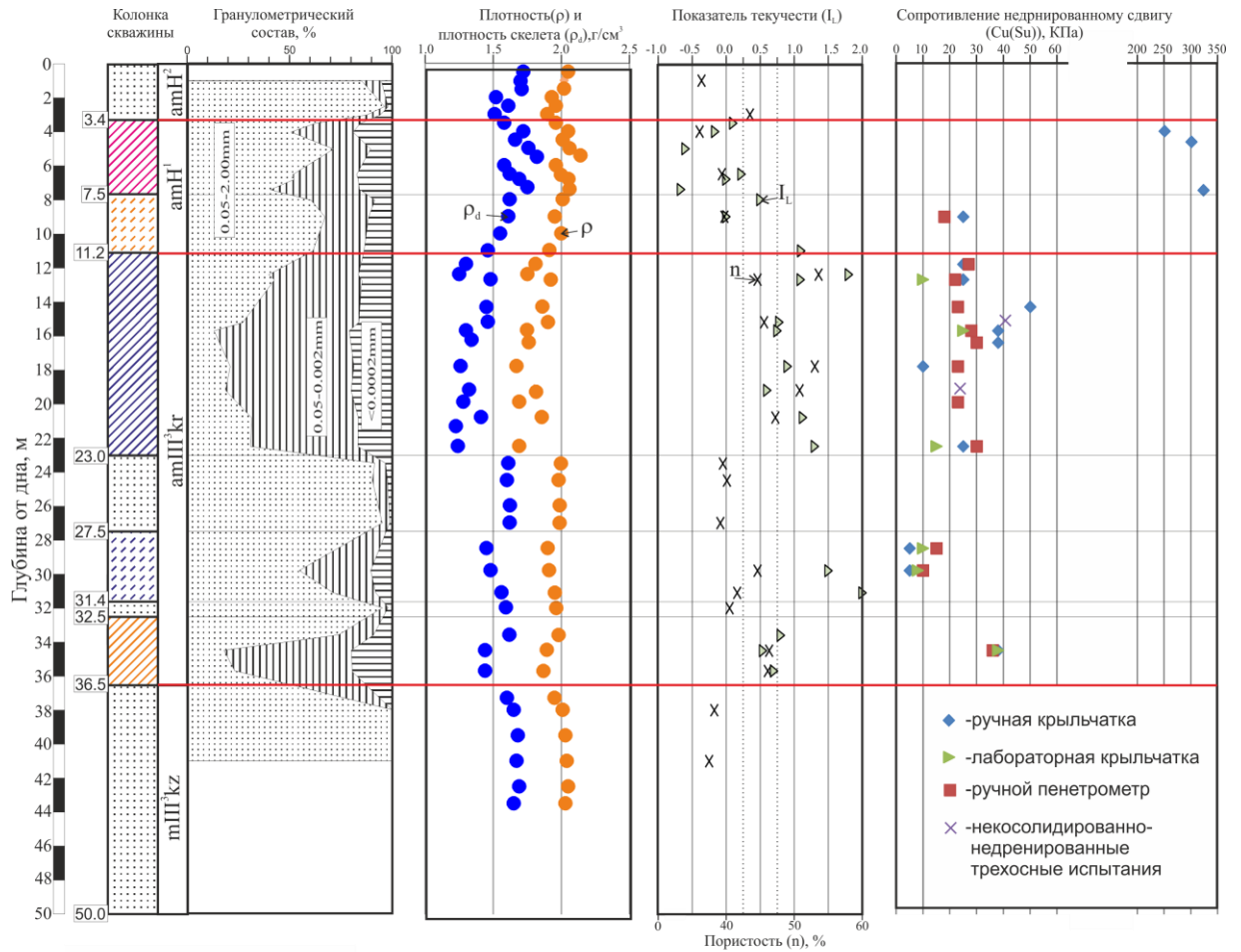


Рис. 9. Изменение значений показателей физико-механических свойств по разрезу скважины №5 площадки Т2. Условные обозначения к колонке скважины см. Рис. 6.

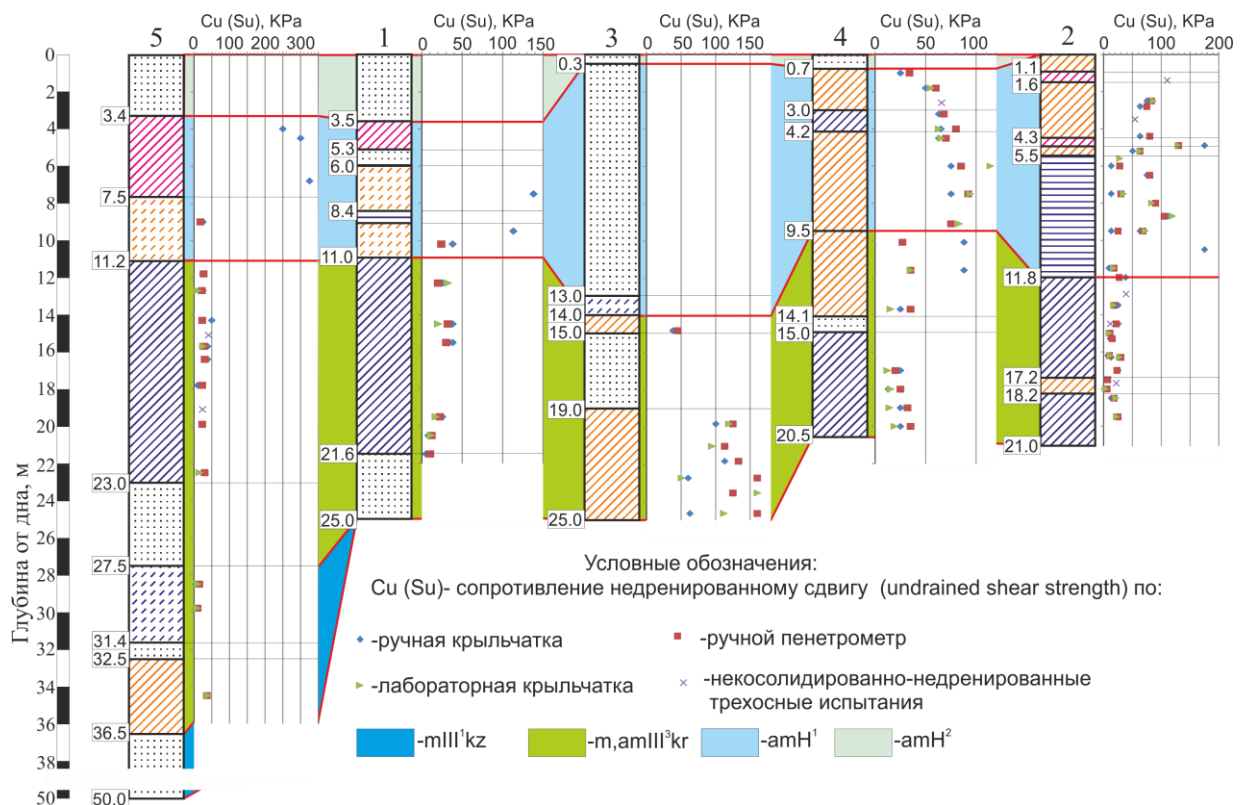


Рис. 10. Корреляция графиков изменения сопротивления недренированному сдвигу по разрезам скважин площадки Т2. Условные обозначения к колонке скважины см. Рис. 6.

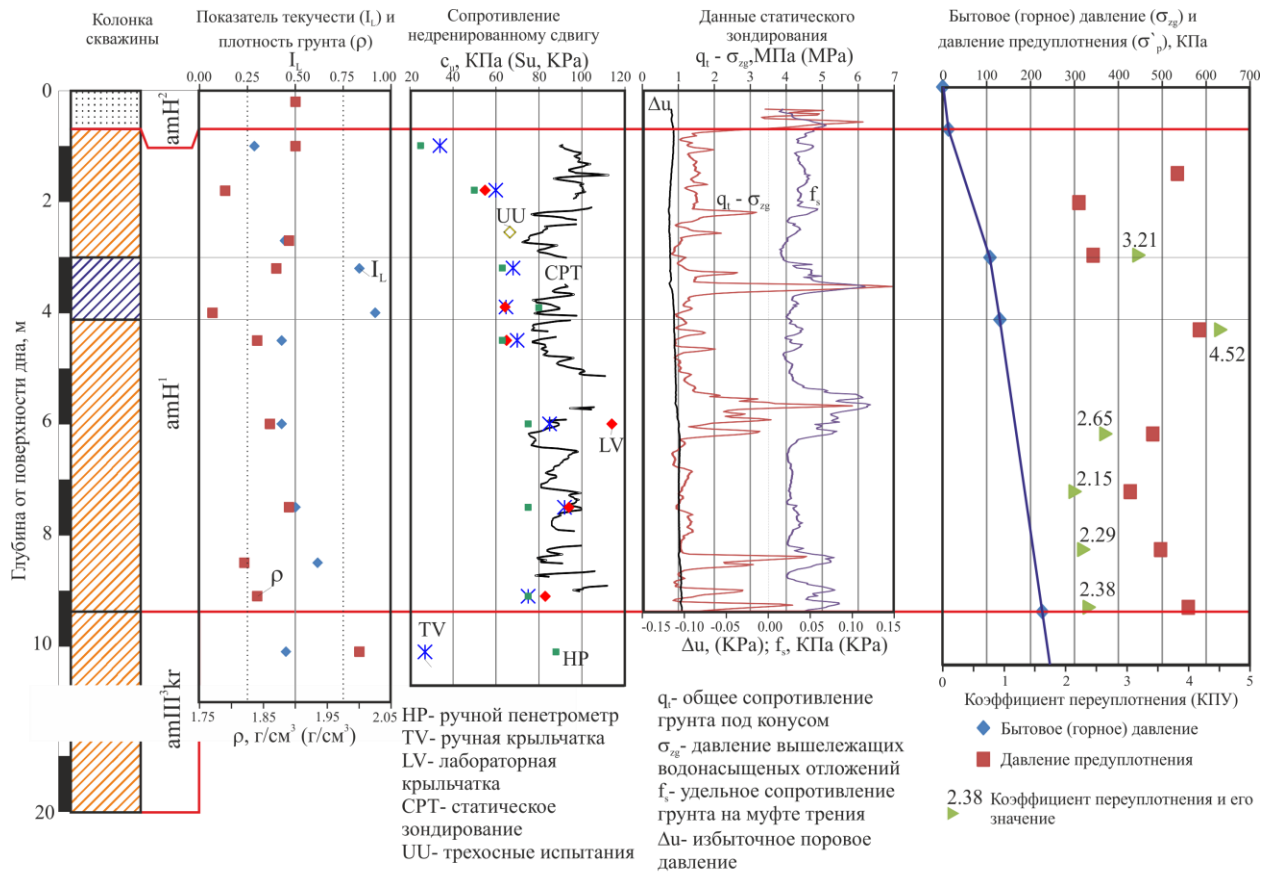


Рис. 11. Физико-механические свойства, данные статического зондирования и значения давления предуплотнения и коэффициента переуплотнения грунтов в разрезе скважины №4

Обсуждение результатов. Основываясь на Унифицированной региональной схеме стратиграфического расчленения четвертичных отложения севера Западной Сибири [Волков, Бабушкин, 2000], а также на работе [Рокос и др., 2019] в изученном на площадках изысканий интервале осадочной толщи нами выделены следующие стратиграфо-генетические комплексы (снизу-вверх):

- *Морские отложения казанцевского горизонта (mIII¹kz).* Сопоставляются с отложениями ССК-IV (рис. 3-5). В ядрах скважин представлены неслоистыми рыхлыми-среднеплотными мелкими и пылеватыми песками преимущественно сортированными (рис. 6-8). На сейсмических временных разрезах, полученных в мористой части за пределами зоны газонасыщения, в этой толще наблюдается слоистая складчатая структура [Слинченков и др., 2009].

- *Морские, аллювиально-морские отложения каргинского горизонта (m,amIII³kr).* Сопоставляются с ССК-III. Представлены слоистыми суглинками и супесями с пропластками и линзами песков мелкого и пылеватого состава. Консистенция суглинков изменяется от текучей до тугопластичной, супеси в основном текучие. Данные образования слагают клиновидное тело, выклинивающееся в мористом направлении (рис. 4). По видимому это тело представляет собой подводное основание каргинской террасы. Подобные тела неоднократно выделялись по сейсмическим данным и вскрывались скважинами в других прибрежных районах Обской губы.

- *Аллювиально-морские древнеголоценовые отложения (amH¹).* Сопоставляются с ССК-II. Представлены слоистыми супесями, суглинками и глинами с вложенными крупными линзами мелких и пылеватых песков. Консистенция глин текучая, супесей-пластичная, суглинки изменяют свое состояние от текучего до твердого при общем преобладании мягко-тугопластичных разновидностей.

• *Современные аллювиально-морские осадки (amH^2)*. Сопоставляются с ССК-I. Представлены преимущественно пылеватými песками с мелкими линзами и гнездами, а также тонкими глинистыми прослоями. Интенсивно насыщены черным гидротроилитом.

Значения абсолютного возраста отложений, отнесенных нами к каргинскому горизонту, изменяются в диапазоне от $18\ 840 \pm 49$ до $17\ 300 \pm 38$ лет (рис. 6). Этот диапазон не соответствует геохронологическим рамкам каргинского времени (59-27 тыс. лет) и попадает в границы сартанского криохрона (29.0-11.7 тыс. лет). По нашему мнению, это может быть обусловлено тем, что данные образования формировались в эстуарном бассейне, унаследованном с каргинского времени. Значение абсолютного возраста, полученное в древнеголоценовой толще ($9\ 500 \pm 20$ лет) соответствует геохронологическим рамкам раннего голоцена.

Неоднородность состава каргинских и древнеголоценовых отложения вероятно связана с тем, что они формировались вблизи берега в условиях сублиторали на фоне относительно частых колебаний уровня моря. Это привело к частым взаимным замещениям в разрезе и по простирацию глинистых, суглинистых, супесчаных и песчаных разностей.

На графиках изменчивости показателей физико-механических свойств грунтов по разрезам скважин ожидаемый (нормальный) тренд значений по глубине отсутствует (рис. 9, 10). В отдельных интервалах наблюдаются инверсии вертикального распределения свойств. Под нормальным трендом обычно понимается увеличение значений плотности и прочности глинистых грунтов с глубиной при параллельном снижении прочности, пористости и текучести. Такая картина обусловлена консолидацией грунта под действием бытового или горного давления (напряжений в скелете, вызванных собственным весом грунта).

Безградиентный и, местами, инверсионный характер распределения свойств по разрезам скважин, а также присутствие консолидированных разновидностей, перекрывающих средне- и неконсолидированные, вероятно связаны с дегидратацией глинистых грунтов при регрессиях. Дегидратация обусловлена, очевидно, испарением влаги в субаэральных условиях и морозным иссушением верхней части толщи. Последнее связано с миграцией влаги с нижних горизонтов грунтовой толщи к приповерхностному фронту промерзания.

Также, очевидно, что при регрессиях на участках, покрытых локальными континентальными водоемами (реками, озерами и др.), дегидратация происходила менее интенсивно. Развитые здесь глинистые образования отличаются меньшей степенью консолидации. С этим, вероятно, связана высокая степень латеральной неоднородности свойств грунтов.

Наиболее значимой регрессией из имевших место за время формирования голоценовых образований являлась, по видимому, произошедшая на рубеже раннего и позднего голоцена (поздний бореал?). В течение этого события толща ранее накопившихся аллювиально-морских осадков древнего голоцена испытала достаточно глубокую дегидратацию. Это привело к формированию в ее верхней части слоя высоко консолидированных переуплотненных образований твердой-полутвердой консистенции. В тоже время нижние горизонты грунтовой толщи, затронутые субаэральной дегидратацией и морозным иссушением в значительно меньшей степени, в основном сохранили свое среднеконсолидированное и неконсолидированное состояние.

Наличие слоев и линз неконсолидированных глинистых грунтов текучей-текучепластичной консистенции, залегающих на глубинах более 10-20 м от дна с одной стороны обусловлено, вероятно, процессами промерзания при регрессиях и последующем протаивании при трансгрессиях. Образующийся при эпигенетическом промерзании в пористом пространстве лед разрушает сформированные при диагенетической консолидации и субаэральной дегидратации коагуляционные связи между глинистыми частицами и их агрегатами. После последующего вытаивания льда эти связи

восстанавливаются лишь частично и в сильно ослабленной форме [Неизвестнов и др., 2012]. В результате происходит существенное разуплотнение или деконсолидация глинистых грунтов. С другой стороны, очевидно, что относительно большая глубина залегания слоев глинистых грунтов от древней субаэральной поверхности позволила избежать им существенной дегидратации и морозного иссушения.

Выводы.

1. Участок акватории, в пределах которого расположены площадки изысканий, представляет собой подводную абразионно-аккумулятивную террасу. Возраст террасы предположительно древнеголоценовый.

2. Развитая на площадках изысканий осадочная толща в диапазоне глубин до 50-60 м от поверхности дна представлена образованиями верхнего плейстоцена и голоцена. В составе толщи выделены морской казанцевский ($mIII^1kz$); морской-аллювиально морской каргинский ($m,amIII^3kr$); аллювиально-морские древнеголоценовый (amH^1) и современный (amH^2) комплексы.

3. Изученные отложения весьма неоднородны по своему составу. Отмечаются резкие замещения в разрезе и по латерали глинисто-суглинистых отложений песчано-супесчаными. Эти замещения обусловлены, вероятно, изменчивыми условиями седиментации, которая происходила в прибрежном относительно мелководном бассейне на фоне частых колебаний уровня моря.

4. Глинистые разновидности грунтов изученного интервала осадочной толщи характеризуются безградиентной изменчивостью свойств по разрезам скважин, а также наличием высоко консолидированных образований твердой-полутвердой консистенции, перекрывающих менее консолидированные образования мягко-тугопластичной и текучей-текучепластичной консистенции. Такая картина, по видимому, обусловлена частыми регрессиями в ходе которых происходила субаэральная дегидратация и морозное иссушение грунтов.

5. Характерна латеральная неоднородность состояния и свойств глинистых грунтов, связанная с наличием на древних субаэральных поверхностях локальных континентальных водоемов. Водный покров этих водоемов предохранял залегающие под ними грунты от дегидратации.

6. Наличие слоев неконсолидированных глинистых грунтов текучей-текучепластичной консистенции на глубинах более 10-20 м от поверхности дна обусловлено процессами эпигенетического промерзания при регрессиях и последующего таяния при трансгрессиях.

ЛИТЕРАТУРА

Неизвестнов Я.В., Козлов С.А., Кондратенко А.В. Изменчивость и неоднородность физико-механических свойств новейших отложений шельфа морей Северного Ледовитого Океана // Записки Горного Института. 2012. Т. 197. С. 203-208.

Рокос С.И., Тарасов Г.А. Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2007. №67. С. 66-75.

Рокос С.И., Куликов С.Н., Костин Д.А. Субаквальные многолетнемерзлые породы Обской и Тазовской губ Карского моря // Криосфера Земли. 2019. Т. 23. №5. С. 17-26. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2019-5(17-26)

Слинченков В.И., Самойлович Ю.Г., Николаев В.В., Константинов В.М. Стрoение кайнозойских отложений северной части Обской губы Карского моря по акустическим данным // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 2(82). С. 106-117.

Унифицированная региональная стратиграфическая схема четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины. Ред. В.С.Волкова, А.Е.Бабушкин. Новосибирск, Изд-во СНИИГГиМС, 2000, 64 с.

STRATIGRAPHY AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BOTTOM SOILS IN THE AQUATORIAL PART OF THE SALMANOVSKY FIELD AREA (NORTHERN PART OF THE OB BAY)

Rokos S.I.¹, Kostin D.A.², Gainanov V.G.³, Kulikov S.N.¹, Skurikhin V.A.¹

¹JSC "Arctic Marine Engineering-Geological Expeditions", Murmansk, Russia

²Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

There are establish that in consequence of engineering-geological surveys for the most part of the Salmanovsky field area is located on an Ancient Holocene marine abrasion-accumulative terrace. There are identified deposits of the Kazanian and Karganian horizons, Ancient Holocene and Recent sediments in the upper interval of the soil stratum to a depth of 50-60 m from the bottom. Ancient Holocene deposits are overconsolidated (overconsolidation ratio more than 2) and have a hard/stiff consistency. The underlying coeval and Karginian deposits have very soft/soft consistency. The logs of properties across geological cross-section is of an inversion nature, due to the variability of sedimentation and diagenesis conditions.

Keywords: *Ob Bay, Salmanovsky field, quaternary deposits, bottom soils, absolute age, physical and mechanical properties, overconsolidation ratio*

REFERENCES

Neizvestnov Ya.V., Kozlov S.A., Kondratenko A.V. Variability and heterogeneity of physical and mechanical properties of recent shelf sediments of the seas of the Arctic Ocean // Notes of the Mining Institute. 2012. T. 197. P. 203-208.

Rokos S.I., Tarasov G.A. Gas-saturated sediments of the lips and bays of the southern part of the Kara Sea // Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period. 2007. No. 67. pp. 66-75.

Rokos S.I., Kulikov S.N., Kostin D.A. Subaquatic permafrost rocks of the Ob and Taz bays of the Kara Sea // Cryosphere of the Earth. 2019. T. 23. No. 5. P. 17-26. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2019-5(17-26)

Slinchenkov V.I., Samoilovich Yu.G., Nikolaev V.V., Konstantinov V.M. The structure of Cenozoic sediments of the northern part of the Ob Bay of the Kara Sea according to acoustic data // Arctic and Antarctic Research. 2009. No. 2(82). P. 106-117.

Unified regional stratigraphic scheme of Quaternary deposits of the West Siberian Plain. Ed. V.S.Volkova, A.E.Babushkin. Novosibirsk, Publishing House SNIIGGiMS, 2000, 64 p.