

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.583:624.139

МОНИТОРИНГ НАДМЕРЗЛОТНЫХ ВОД В НАСЫПНЫХ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ
ЗАПОЛЯРНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ПУР-ТАЗОВСКОЕ МЕЖДУРЕЧЬЕ

О.Г. Кистанов, В.Н. Матковский, В.Б. Стебунов

ООО “Газпром добыча Ямбург”, 629300, Ямало-Ненецкий автономный округ,
Новый Уренгой, ул. Геологоразведчиков, 9, Россия, kisolgen@rambler.ru

Во время проведения геокриологического мониторинга на территории Заполярного месторождения в 2007–2008 гг. была изучена динамика грунтовых вод, залегающих в планировочных насыпях, сложенных пылеватými песками. Описана методика проведения наблюдений. Выявлены причины возникновения морозного пучения для техногенных участков.

Насыпь, мониторинг, грунтовые воды, пучение

MONITORING OF SUPRAPERMAFROST GROUND WATER
IN SANDY FILLED-UP GROUND OF ZAPOLYARNOE GAS AND OIL FIELD, PUR-TAZ INTERFLUVE

O.G. Kistanov, V.N. Matkovskii, V.B. Stebunov

LTD “Gazprom dobycha Yamburg”, 629300, Yamalo-Nenetsky Autonomous District,
Novui Urengoi, str. Geologorazvedchikov, 9, Russia, kisolgen@rambler.ru

In 2007–2008, during the geocryological monitoring on the territory of the Zapolyarnoe Field, the dynamics of ground water occurring in the planning embankments composed of silty sands was studied. The method of observation has been demonstrated and conditions for the occurrence of frost heave for anthropogenic areas have been identified.

Embankment, monitoring, ground water, heave

ВВЕДЕНИЕ

Освоение нефтегазовых месторождений Западной Сибири перемещается в северные области распространения многолетнемерзлых пород, для которых характерны более сложные геокриологические условия. Все больше проявляется значение геокриологической среды как одного из факторов надежности геотехнических комплексов на территории месторождений. Так, с сохранением мерзлого состояния грунтов связано обеспечение устойчивости и надежной, безаварийной эксплуатации объектов добычи, подготовки и транспортировки углеводородного сырья.

С целью постоянного контроля динамики состояния многолетнемерзлых грунтов и уточнения результатов прогноза на ряде месторождений организовано проведение инженерно-геокриологического (геотехнического) мониторинга. Применительно к геокриологии термин “мониторинг” стал употребляться со второй половины 1980-х гг., заменив термин “стационарные исследования (наблюдения)”.

На Заполярном месторождении к числу наиболее сложноорганизованных геотехнических систем относятся площадки установок комплексной подготовки газа (УКПГ). В настоящее время в эксплуатации находятся три площадки и две в стадии строительства. В статье рассматривается ситуация на УКПГ-3С, где неоднородность геологических условий обусловлена как генезисом пород, так и наличием насыпных грунтов. В качестве грунтов отсыпки используются местные песчаные пылеватые пески.

Расчет мощности насыпи основан на обеспечении планировки площадки УКПГ и создании дополнительного термического сопротивления на поверхности рельефа, исключаяющего глубокое сезонное оттаивание естественных грунтов. Инженерная защита грунтового основания включает оборудование лотков, обеспечивающих сток поверхностных вод и дренаж грунтовых вод. Глубина заложения лотков не превышает 0,7 м при средней мощности насыпи 2,0–2,5 м. В проектных расчетах

грунтовых оснований насыпной слой рассматривается как элемент с однородными, выдержанными физико-механическими свойствами и характеристиками. С вводом в эксплуатацию УКПГ установлено, что в период осенне-зимнего промерзания в теле насыпи сохраняются значительные объемы надмерзлотных вод.

В работах [Хрусталева, 1971; Булдович и др., 1998; Рязанов, 2001] изучена связь условий теплообмена в насыпных и подстилающих грунтах при определенном влажностном режиме в теле насыпи и при верхних граничных условиях.

Для адекватной оценки годовых теплооборотов и закономерностей формирования геотемпературного режима грунтового основания была предложена и осуществлена крупномасштабная гидрогеологическая съемка, которая проводилась по всей площадке УКПГ. Осуществлялись наблюдения за изменением уровня грунтовых вод в течение осенне-зимнего периода во время промерзания насыпи. Исследования проводились совместно с другими мероприятиями по геокриологическому мониторингу на объектах газодобывающего комплекса.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Заполярное нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ) расположено на севере Западно-Сибирской низменности в междуречье нижних течений рек Таз и Пур (рис. 1). Площадь месторождения 8745 га, длина 50 км, ширина 30 км.

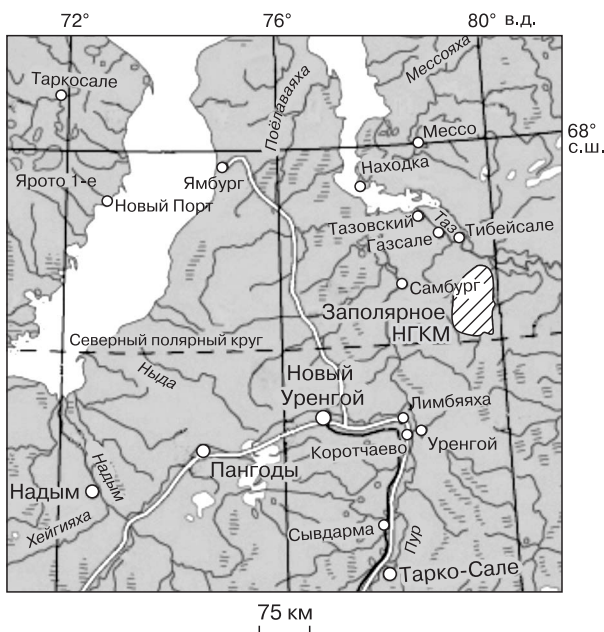


Рис. 1. Карта расположения района исследования (заштрихованная область).

В административном отношении территория находится в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области. В соответствии с физико-географическим районированием месторождение расположено в Нижнетазовской провинции лесотундровой зоны.

Согласно климатическому районированию России для строительства, рассматриваемый район находится в северной строительной-климатической зоне с суровыми условиями [СНиП 23-01-99]. Здания и сооружения на месторождении построены по первому принципу строительства на многолетнемерзлых грунтах.

Климат района в значительной степени определяется его географическим положением в высоких широтах, близостью Арктического бассейна, влиянием арктических и атлантических циклонов, характером рельефа. Зимой и осенью преобладают ветра с южной составляющей (за счет циклонической деятельности), а летом – северные и северо-восточные, обусловленные вторжением холодного арктического воздуха на материк.

В непосредственной близости к Заполярному НГКМ метеостанций нет, за исключением Заполярной мерзлотной лаборатории, осуществляющей наблюдения за температурой воздуха с 2002 г. Ближайшие метеостанции расположены в пос. Уренгой (в 105 км к югу от месторождения) и в пос. Тазовский (в 88 км к северу).

По данным архива [<http://rp5.ru>], для пос. Тазовский общее количество годовых осадков в районе исследования составляет от 479 до 736 мм (табл. 1). Наличие многочисленных рек, озер и болот способствует большей влажности климата. Существенное влияние на территориальную дифференциацию климатических характеристик, в частности на распределение осадков и формирование микроклиматических особенностей, оказывает рельеф.

Снежный покров появляется в октябре. Для территории Заполярного НГКМ характерны обильные снегопады с общими и низовыми метелями. Высота снежного покрова во многом зависит от растительности и ветрового перераспределения, при этом происходит уплотнение снега до 400 кг/м³. Минимальные значения мощности снежного покрова приурочены к открытым по-

Таблица 1. Объемы осадков по метеостанции пос. Тазовский

Год	Количество осадков, мм		Сумма осадков, мм
	жидких	твердых	
2006	185,8	293,1	478,9
2007	346,2	387,9	734,1
2008	246,0	489,7	735,7
2009	182,0	332,1	514,1

верхностям, максимальные – к понижениям рельефа и участкам с преобладанием кустарниковой растительности. На территории УКПГ также проследить значительная дифференциация мощности снежного покрова вследствие ветрового перераспределения среди сооружений, а также уборки и уплотнения снега с дорог и между строениями. Формирование и морфология снежного покрова на площадках в течение зимнего сезона описывается с помощью площадной снегомерной съемки, проводимой в ноябре–декабре и марте–апреле. Минимальные мощности в конце зимнего периода находятся под неогороженными проветриваемыми подпольями (0–0,2 м), а максимальные – среди эстакад трубопроводов (более 1,0 м).

Месторождение характеризуется сплошным распространением толщи мерзлых пород (ТМП) сливающегося и несливающегося типов. По данным бурения газовых скважин, максимальная мощность криолитозоны 550 м. Кровля ТМП максимально погружается до глубины 70–80 м в таликах под руслами рек.

В границах месторождения современный рельеф имеет унаследованный характер. Четвертичные отложения залегают на размытой поверхности верхнего палеогена, образуя сплошной покров мощностью в десятки метров. Отложения представляют собой полигенетическую толщу.

Участки площадок УКПГ сложены в основном суглинками морского и прибрежно-морского генезиса. Льдистость пород до глубины 5 м изменяется в пределах 0,15–0,42 д.е. С глубиной льдистость уменьшается до 0,03–0,10 д.е. В мерзлых грунтах преобладает массивная криотекстура.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидрогеологическая съемка надмерзлотных грунтовых вод сезонноталого слоя (СТС) включает:

- определение глубины СТС как с помощью температурных наблюдений по сети термометрических скважин [ГОСТ 26262-84], так и щупом, непосредственно в гидрогеологических скважинах;

- определение уровня грунтовых вод с помощью мерной рейки.

Организация наблюдательной гидрогеологической сети производится на базе оценки рельефа под отсыпкой, сложенного суглинком, мощности отсыпки, а также расположения сооружений и конструктивных особенностей оснований. При этом учитываются мощность снежных отложений по площадке УКПГ, распределение температуры пород, глубина сезонного оттаивания.

В результате анализа указанных параметров определяется количество и расположение гидро-

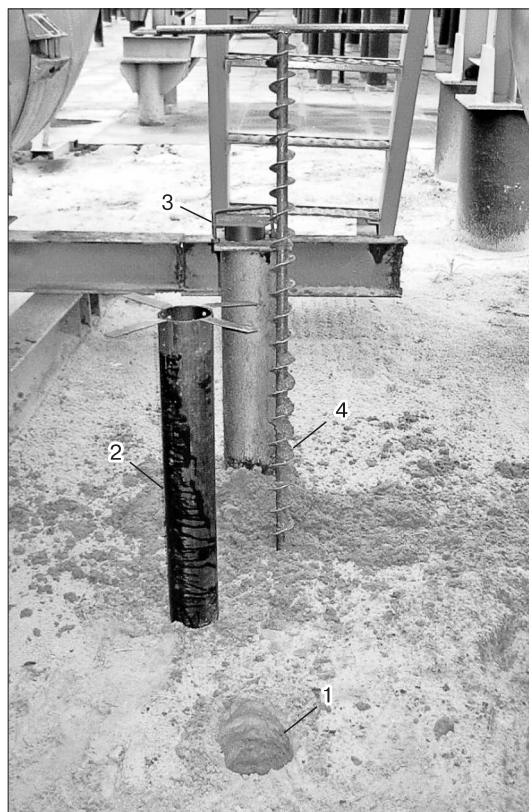


Рис. 2. Оборудование пьезометрической скважины:

1 – скважина; 2 – обсадная труба; 3 – крышка; 4 – ручной шнек.

геологических скважин. В итоге данные, полученные при наблюдениях в гидрогеологических скважинах, должны описывать режим уровня грунтовых вод (УГВ) в различных геотехнических условиях площадки УКПГ.

Для наблюдения за уровнем грунтовых вод используется сеть гидрогеологических (пьезометрических) скважин, которые пробурены ручным

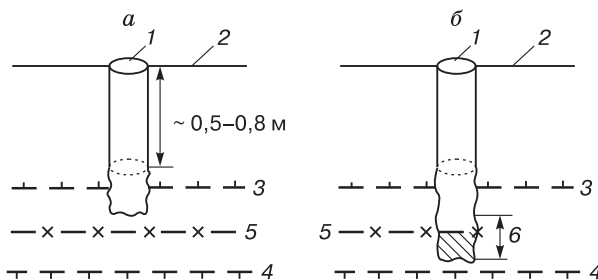


Рис. 3. Определение уровня грунтовых вод:

a – до углубления шнеком; *б* – после углубления шнеком; 1 – обсадка гидрогеологической скважины; 2 – поверхность отсыпки; 3 – глубина промерзания; 4 – глубина СТС; 5 – УГВ; 6 – выбранный шнеком песок.

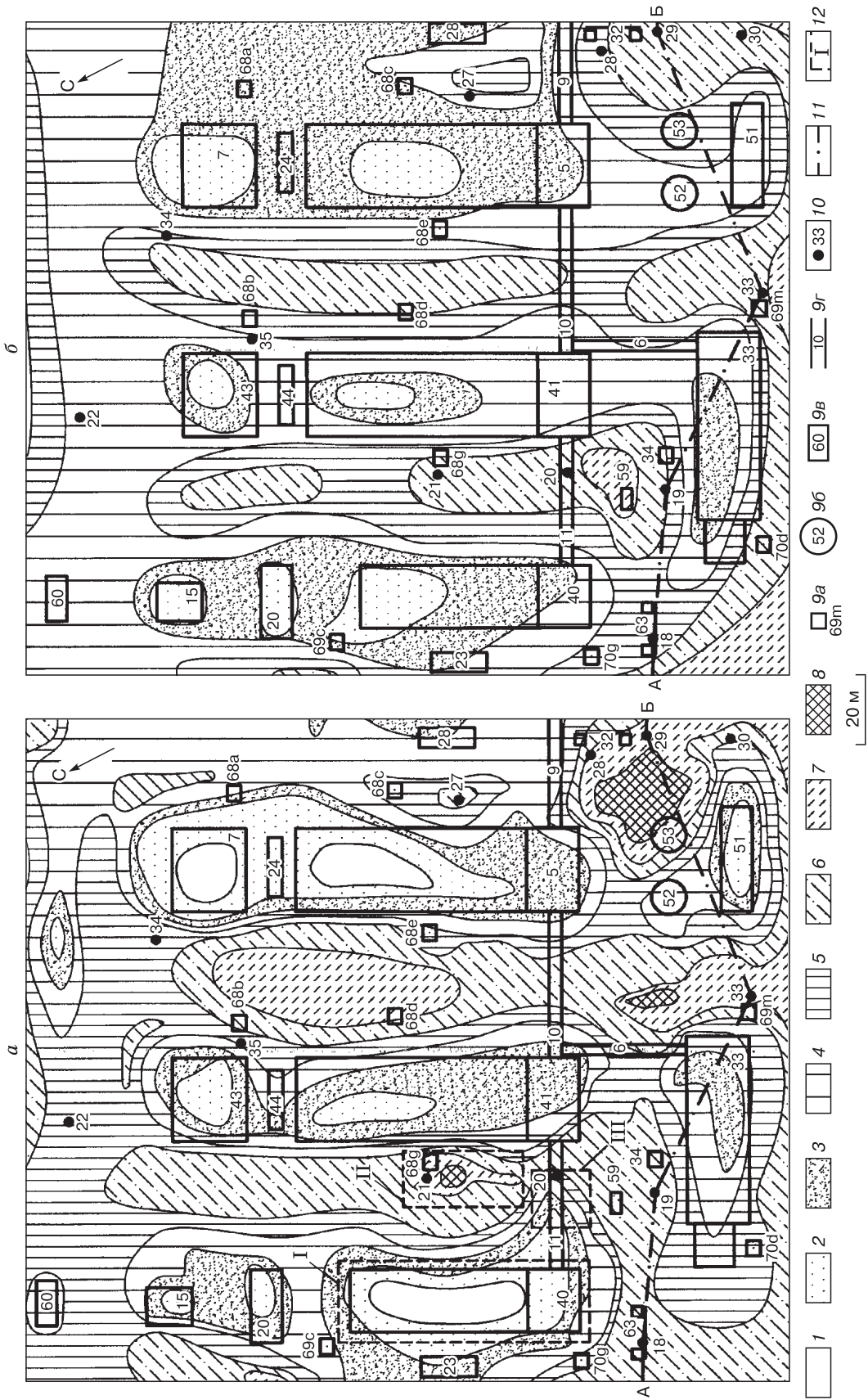


Рис. 4. Фрагмент карты мощности водонасыщенного слоя:

a – ноябрь 2007 г.; *б* – ноябрь 2008 г.; 1–8 – мощности водонасыщенного песка (1 – 0 м; 2 – 0–0,25 м; 3 – 0,25–0,50 м; 4 – 0,50–0,75 м; 5 – 0,75–1,00 м; 6 – 1,00–1,25 м; 7 – 1,25–1,50 м; 8 – 1,50–1,75 м); 9а – маты, 9б – емкости, 9в – сооружения, 9г – переходные галереи и их номера; 10 – номер гидрогеологической скважины; 11 – линия разреза; 12 – контуры зон распределения воды.

шнеком на глубину около 1 м в песчаном грунте отсыпки. На территории площадки УКПГ находится 40 гидрогеологических скважин. Каждая из них открыта в нижней части и обсажена в приповерхностном слое грунта на 0,5–0,8 м, а сверху накрыта защитной крышкой (рис. 2).

Во время осенне-зимнего сезона стенки скважин выше горизонта водонасыщения не осыпаются, что позволяет осуществлять прямое опробование грунтов по глубине промерзания, определение уровня грунтовых вод, глубины водоупора и мощности талого слоя. При возникновении криогенного напора происходит повышение УГВ, которое также свободно фиксируется в гидрогеологической скважине. Когда между измерениями наблюдается понижение уровня воды ниже забоя скважины, производится углубление гидрогеологической скважины с помощью ручного шнека до фиксирования нового уровня грунтовых вод (рис. 3).

В течение октября–декабря производились периодические замеры уровня надмерзлотных вод в теле отсыпки с интервалом 7–14 сут. После начала сезонного промерзания грунтов отсыпки дополнительно осуществлялись замеры по определению глубины промерзания СТС. После окончания изменения уровня грунтовых вод вследствие транзита и подпитки жидкими осадками или при достижении промерзанием УГВ определялась мощность водонасыщенного песка, которая фиксировалась в конце ноября–декабре для большей части рассматриваемой территории. По полученным данным об уровнях воды в скважинах составлялись карты мощности водонасыщенного песка (рис. 4), где в качестве водоупорной границы принималась кровля толщи мерзлых грунтов. Если глубина сезонного слоя превышала мощность отсыпки, то за водоупор принималась поверхность естественного рельефа, сложенного суглинком. Данные по глубине СТС и расположению кровли ТМП получали по результатам осенней площадной геотемпературной съемки, а также зондировки щупом в гидрогеологических скважинах и дополнительных точках.

Предложенная методика наблюдений за УГВ позволяет расположить пьезометрические скважины на уже эксплуатируемых объектах или на стадии строительства в непосредственной близости от оснований и фундаментов сооружений. Для оборудования пьезометрических скважин требуются минимальные затраты при их создании и эксплуатации по сравнению с обычной конструкцией гидрогеологической скважины, которая будет подвержена кольматации фильтра с необходимостью его промывки, а при эксплуатации объекта может произойти повышение кровли ТМП, что приведет к выводу скважины из строя.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одним из факторов, определяющих водонасыщение и особенности водно-фильтрационных свойств в насыпях, является их состав – пылеватые пески.

Режимные наблюдения показали, что единственным источником питания надмерзлотных вод являются дождевые воды. Так как площадка УКПГ находится на местном водоразделе, то исключается подпитка насыпи за счет поверхностных вод со смежных территорий. Зачистка и вывоз снежного покрова за пределы площадки минимизирует уровень талых вод на поверхности насыпи в период весеннего снеготаяния. Талые воды стекают за пределы площадки по мерзлой поверхности. В случае растепления на отдельных участках просачивающаяся вода замерзает в приповерхностном песчаном слое, образуя новую водоупорную поверхность.

Сток надмерзлотных грунтовых вод за пределы площадок продолжается в течение 1,5–2 месяцев после наступления устойчивых заморозков. В октябре–декабре из-за различий глубин СТС и темпов промерзания насыпи накопленная в теле насыпи вода продолжает перераспределяться внутри тела отсыпки площадки УКПГ. В этот период формируются следующие зоны распределения воды в теле отсыпки:

I – без водонасыщения (под крупными сооружениями);

II – зона транзита надмерзлотных вод;

III – с застойным режимом и частичной аккумуляцией воды: а) с образованием напора к концу декабря для локальных объемов воды, расположенных между сооружениями; б) без напора с большими объемами воды, которые не промерзают в течение зимнего периода.

Наблюдения 2007–2008 гг. позволили выделить и ограничить области с максимальной мощностью водонасыщенного песка (аккумуляции надмерзлотных вод), транзитные зоны, а также участки с наименьшим водонасыщением (см. рис. 4).

На рис. 5 представлен разрез по линии А–Б, где отражено влияние мощности водонасыщенного слоя песка на формирование температурного поля после зимнего периода 2007/08 г. (см. рис. 5, а) и 2008/09 г. (см. рис. 5, б), а также высота снежного покрова на конец зимнего периода. По разрезу наиболее высокотемпературные массивы ТМП после зимы приурочены к областям, где мощность водонасыщенных песков составляла от 1 м и более, а мощность снежного покрова превышала 0,7 м.

Наибольшее влияние водонасыщения отмечается в районе гидрогеологической скважины № 33. По данным замеров температуры, в ближайшей термоскважине глубиной 10 м в мае 2008 г. темпе-

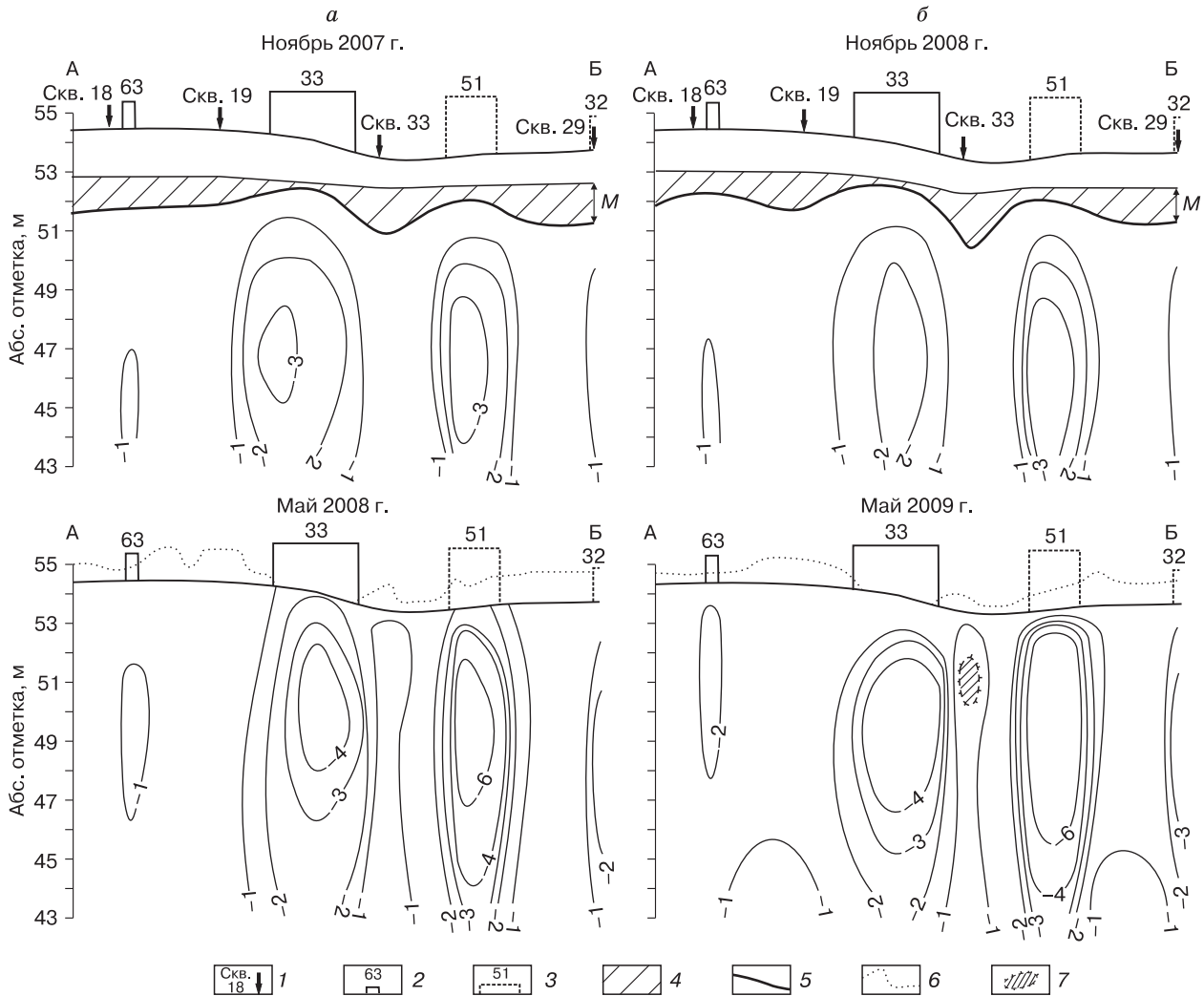


Рис. 5. Криогидрогеологический разрез по линии А–Б:

а – осень 2007–весна 2008 гг.; *б* – осень 2008–весна 2009 гг.; 1 – гидрогеологические скважины; 2 – сооружения по линии разреза; 3 – сооружения вблизи линии разреза; 4 – мощность водонасыщенного песка (*М*); 5 – граница водоупора; 6 – высота снежного покрова в марте соответствующего года; 7 – талый участок.

ратура была в интервале от $-0,1$ до $-0,6$ °С, а через год значения температуры составляли от 0 до $-0,4$ °С с непромерзшей водонасыщенной областью на глубине около 1,6–3,2 м от поверхности грунта.

В табл. 2 и на рис. 6, *а* представлены наблюдаемые параметры для зоны транзита надмерзлотных вод в скважине № 2, находящейся в 150 м на северо-запад от центра сооружения № 60 (см. рис. 4). В данной точке происходит постепенное снижение мощности водонасыщенного песка в течение осенне-зимнего периода. Понижение и сохранение небольшой мощности снега на данной скважине связано с близким (около 0,5 м) расположением к шаровому крану для трубы диаметром 1000 мм, вокруг которого происходит выдувание

снега в течение всего зимнего периода. Это приводит к быстрому увеличению глубины сезонного промерзания при понижении температуры воздуха и к промерзанию на 1,25 м к 12 декабря 2007 г. и на 1,65 м к 12 декабря 2008 г.

В табл. 3 и на рис. 6, *б* представлен режим надмерзлотных вод в скважине № 24, расположенной в 145 м на северо-восток от центра сооружения № 60 (см. рис. 4), для зоны с частичной аккумуляцией воды в завершающий период наблюдения, с последующим образованием напора на 10 декабря 2008 г. На данной гидрогеологической скважине влияние снежного покрова на глубину промерзания очевидно. Так, она составляет 0,82 м на 13 декабря 2007 г. и 0,90 м на 25 ноября 2008 г. при мощности снега 0,38 и 0,30 м соответственно.

Таблица 2. Наблюдения на гидрогеологической скважине № 2 в 2007–2008 гг.

Замеряемый параметр	Год	Дата замеров										
		24.IX	29.IX	15.X	22.X	29.X	08.XI	11.XI	22.XI	28.XI	09.XII	12.XII
Температура воздуха, °С	2007	+7,4	+0,1	-0,6	-11,0	-0,6	-17,4	-10,9	-22,0	-7,6	-2,4	-5,6
	2008	+7,0	+1,0	-5,0	-0,5	+0,5	-17,1	-26,6	-5,7	-19,9	-33,0	-15,0
Мощность снежного покрова, м	2007	-	-	-	-	-	-	-	0,05	0,10	-	0,05
	2008	-	-	-	-	-	-	0,20	0,02	-	0,01	0,02
Глубина сезонного промерзания, м	2007	-	-	-	-	-	-	-	0,75	1,35	-	1,25
	2008	-	-	-	0,89	0,88	-	1,12	1,30	-	1,50	1,65
УГВ от поверхности отсыпки, м	2007	0,97	0,88	-	-	1,10	0,98	-	1,33	1,39	-	1,52
	2008	0,75	-	1,00	1,16	1,49	-	1,46	1,63	-	1,81	1,92

Примечание. Глубина водоупорного слоя от поверхности отсыпки в 2007 г. составила 2,05 м, в 2008 г. – 1,95 м.

Таблица 3. Наблюдения на гидрогеологической скважине № 24 в 2007–2008 гг.

Замеряемый параметр	Год	Дата замеров										
		15.X	22.X	27.X	29.X	08.XI	11.XI	21.XI	25.XI	29.XI	10.XII	13.XII
Температура воздуха, °С	2007	-0,6	-11,0	-2,6	-0,6	-17,4	-10,9	-16,1	-4,8	-5,8	-9,6	-27,9
	2008	-5,0	-0,5	0,0	0,5	-17,1	-26,6	-8,0	-17,9	-31,8	-32,4	-23,6
Мощность снежного покрова, м	2007	-	-	-	-	0,10	-	0,15	-	0,23	-	0,38
	2008	-	-	-	-	-	0,12	-	0,30	-	0,30	-
Глубина сезонного промерзания, м	2007	-	-	-	-	-	-	-	-	0,58	-	0,82
	2008	-	-	-	-	-	0,60	-	0,90	-	-	-
УГВ от поверхности отсыпки, м	2007	-	-	0,70	-	0,60	-	0,91	-	0,95	-	0,92
	2008	0,79	1,01	-	0,78	-	1,09	-	1,04	-	0,75 (лед)	-

Примечание. Глубина водоупорного слоя от поверхности отсыпки в 2007 г. составила 2,4 м, в 2008 г. – 2,4 м.

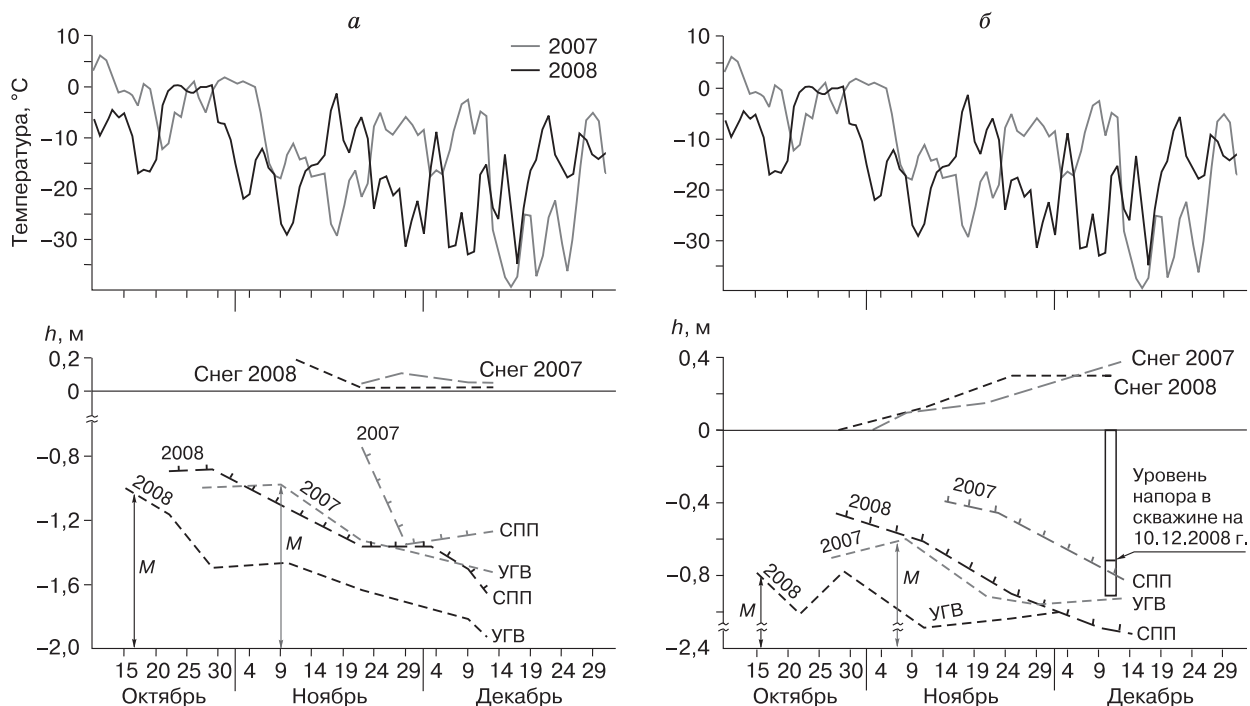


Рис. 6. Изменение глубины сезонного промерзания пород (СПП) и уровня грунтовых вод (УГВ) в гидрогеологических скважинах № 2 (а) и № 24 (б) с учетом средней суточной температуры воздуха с 10 октября по 31 декабря 2007 г. и с 10 октября по 31 декабря 2008 г.

М – мощность водонасыщенного песка.



Рис. 7. Бугор пучения на участке локального заземления надмерзлотных вод после схода снежного покрова в июне.

Образование и распределение водонасыщения в песчаном материале отсыпки в осенне-зимний период на территории УКПГ (помимо различия в глубинах СТС и мощности песка) также связано с накоплением снежного покрова на пространствах между сооружениями и под эстакадами. В итоге из-за различий в мощности снега (выдувов, надувов) скорость промерзания талого слоя на этих участках неодинакова, что приводит к образованию замкнутых объемов водонасыщенного песка под крупными надувами снега. Надувы достигают размеров в плане от 4–5 м² и более, при этом образуются уже к середине–концу декабря. Описываемые участки можно разделить на два типа.

К первому типу относятся участки с застойным режимом надмерзлотных вод при УГВ на глубинах 0,5–0,7 м и менее, с мощностью снега над ними более 40 см, на которых образуются сезонные бугры пучения площадью до 40 м² (рис. 7). Подобные области находятся на территории между крупными корпусами и зачищаемыми от снега дорогами, вне оснований крупных сооружений. Осмотр бугров пучения в весенний период показал, что мощность ледяного ядра составляет не более 0,5 м.

Второй тип – это территории, на которых УГВ находится ниже 0,7 м от поверхности отсыпки. При промерзании не происходит формирования локальных бугров пучения независимо от мощности снежного покрова, а возможно только развитие площадного пучения.

ВЫВОДЫ

Предложена методика мониторинга УГВ и надмерзлотных вод в толще отсыпки из песчаного

материала, которая позволяет улучшить описание и прогнозирование изменения теплофизических свойств грунта для оснований и фундаментов сооружений в природно-техногенной системе на территории обустройства нефтегазодобывающего комплекса в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Анализируя данные, полученные при наблюдении за режимом надмерзлотных вод, были сделаны следующие выводы.

1. Установлено, что несмотря на наличие дренажной системы, тело насыпи полностью не дренируется, особенно в центральной части. Даже в октябре в начале промерзания пород в насыпи сохраняются большие объемы грунтовых вод, накапливающиеся в объеме отсыпки (площадь 120 000 м², мощность 2,0–2,5 м).

2. Выявлено, что при промерзании отсыпки (октябрь–декабрь) перераспределение воды по площади и разрезу из-за различий глубин СТС и скоростей промораживания грунта продолжается в связи с утепляющим влиянием снежного покрова.

3. По глубине расположения УГВ выделены участки с различными типами пучения. Наиболее благоприятные условия для формирования бугров пучения находятся между сооружениями при частичной аккумуляции локальных объемов воды. Процесс пучения практически отсутствует при накоплении больших объемов воды, непромерзающих в течение зимы.

4. Установлена зависимость формирования сезонных бугров пучения площадью до 40 м² от глубины залегания УГВ. Проявление площадного пучения возможно при расположении УГВ ниже 0,7 м от поверхности насыпи.

Литература

Булдович С.И., Гарагуля Л.С., Оспенников Е.Н. Опыт проведения инженерно-геокриологического мониторинга на Ямсовейском газоконденсатном месторождении на севере Западной Сибири // Геоэкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология, 1998, № 6, с. 33–40.

ГОСТ 26262-84. Грунты. Методы полевого определения глубины сезонного оттаивания. М., ПНИИИС Госстроя СССР, 1984, 6 с.

Рязанов А.В. Динамика инженерно-геологических условий при возведении планировочных насыпей (на примере Запалярного газоконденсатного месторождения): Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 2001, 143 с.

СНиП 23-01-99. Строительная климатология. М., ГУП ЦППС, 2000, 70 с.

Хрусталева Л.Н. Температурный режим вечномерзлых грунтов на застроенной территории. М., Наука, 1971, 167 с.

Расписание погоды. (<http://rp5.ru>).

Поступила в редакцию
28 октября 2010 г.