

Название журнала	ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ				
Издательство	Геомаркетинг				
Год выпуска	2013	Том		Номер выпуска	3



	Название статьи	Страницы	Цит.
	КОЛОНКА М.И. БОГДАНОВА	4-5	0
ИСТОРИЯ, ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ			
	АКАДЕМИК ГЕОРГИЙ ИСАЕВИЧ ТЕР-СТЕПАНЯН (1907-2006) Шобакова В.С.	8-13	1
ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ			
	МИГРАЦИОННЫЕ БУГРЫ ПУЧЕНИЯ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ КРИОЛИТОЗОНЫ СРЕДНЕЙ СИБИРИ Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Йошикава К., Чижова Ю.Н., Станиловская Ю.В.	14-34	3
	ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ВЛАГИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ УРАЛЬСКОГО БЕРЕГА БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ Алексютина Д.М., Мотенко Р.Г.	36-43	0
	ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ НАЛЕДИ НА УЧАСТКЕ НЕФТЕПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ Гриб Н.Н., Сясько А.А., Кузнецов П.Ю., Павлов С.С., Качаев А.В.	44-52	0
ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДИНАМИКА			
	К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОБНАЖЕНИЙ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ Бабелло В.А., Смолич К.С.	54-57	0
ГИДРОГЕОЛОГИЯ			
	ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ РЕСПУБЛИКИ КАРАКАЛПАКСТАН Аимбетов И.К.	60-63	0
ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕЛИОРАЦИЯ ГРУНТОВ			
	ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК КОМПЛЕКСНЫХ НИТРАТНЫХ СОЛЕЙ НА СВОЙСТВА ОБЩЕСТРОИТЕЛЬНОГО И ТАМПОНАЖНОГО ЦЕМЕНТА Неверов А.Л., Вертопрахова Л.А., Соловьева И.А., Баталина Л.С., Минеев А.В.	64-71	0
КНИЖНОЕ ОБОЗРЕНИЕ			
	ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ТЕРРИТОРИЙ И СООРУЖЕНИЙ	72	0



ДОРОГОЙ ВЕЛИКОГО КОРМЧЕГО



Электричка из города Нанкин в город Пекин идет четыре часа. Каждые 15 минут отправляется новый состав. Четыре часа пути. В два раза дольше, чем я привык ездить до Петушков из Москвы — наша электричка идет около двух часов... От Москвы до Петушков 120 километров. От Нанкина до Пекина чуть подальше. 1200 километров. В каждом вагоне установлен небольшой дисплей, и пассажир всегда знает, едет он со скоростью 298 или 302 километра в час. Большого разброса по скорости я не видел. Правда, по ощущениям, скорость гораздо ниже. Поезд идет плавно...

В июле 2013 года товарища Лю Чжицзюня (Liu Zhijun) приговорили к смертной казни с отложенным на два года моментом приведения приговора в исполнение. В Китае, где смертная казнь для чиновника, уличенного в коррупции, никого не удивляет, этот приговор, тем не менее, привлек внимание. К смертной казни приговорили министра железных дорог Китайской Народной Республики. 60 летний политик был лишен всех политических прав, его имущество подлежит конфискации. Под руководством товарища Лю Чжицзюня была построена самая протяженная в мире сеть высокоскоростных магистралей. В числе его достижений было среди прочего строительство дороги Цхинхай — Тибет, которая наиболее близка по природным условиям к дороге Обская — Бованенково на Ямале. После аварии поезда в Венчжоу, при которой погибли 40 человек и около 150 пострадали, выяснилось, что его руководство было одной из причин произошедшего. Не исключено, что расследование было вызвано также попытками Лю Чжицзюня за взятки купить себе место в Центральном комитете Коммунистической партии Китая и в Политбюро. этого ему явно не следовало делать... Как выяснилось, строительство скоростных дорог сопровождалось многочисленными фак-





тами коррупции, что министр второго по влиятельности министерства после министерства обороны получил взятки на сумму 64,6 миллиона юаней (около 10,5 миллиона долларов) в период с 1986 по 2011 год. По другим сведениям, министр брал откаты в 4% от суммы договора и накопил сумму в 250 миллионов долларов. Журналисты пришли также к выводу, что министру не следовало иметь 18 любовниц...

По данным агентства «Синьхуа», с октября 2007 года по июнь 2012-го поступило более 6 000 000 жалоб на чиновников, по которым возбудили около 600 000 дел и наказано около 700 000 человек. С 2000 года было расстреляно 10 000 чиновников, 120 000 получили 10–20 лет заключения. Был расстрелян вице-мэр Пекина Лю Чжихуа, руководивший китайской «Силиконовой долиной» в пригороде Пекина и принимавший участие в руководстве

подготовкой к Олимпийским играм, причем изъятые у него миллионы долларов были затем украдены сотрудниками Управления по борьбе с коррупцией Верховной народной прокуратуры. Расстрелян вице-спикер китайского парламента Чэн Кэцзе. Несмотря на это, по мнению китайцев, коррупция в стране процветает. Происходит «капитализация власти». Президент КНР Си Цзинпин сообщил, что, по его мнению, коррупция является одной из наиболее серьезных угроз для легитимности партии, обратив внимание своих коллег на необходимость контролировать действия родных и приближенных к ним людей, не допуская злоупотребления властью.

Неплохо для наших «раздающих» государственные и корпоративные заказы товарищей, что они живут не в Китае...

М.И. Богданов



АКАДЕМИК ГЕОРГИЙ ИСАЕВИЧ ТЕР-СТЕПАНЯН (1907–2006)

ACADEMICIAN GEORGIY ISAEVICH TER-STEPANIAN (1907–2006)

ШИБАКОВА В.С.

Старший научный сотрудник Геологического института РАН, к.г.-м. н., г. Москва, valentina-shibakova@yandex.ru

Ключевые слова:

инженерная геология; академик Г.И. Тер-Степанян; Научный совет АН СССР по инженерной геологии и гидрогеологии.

Аннотация

Данная публикация продолжает серию статей В.С. Шибаковой о Научном совете АН СССР по инженерной геологии и гидрогеологии и об ученых, которые были с ним связаны. Она посвящена члену совета академику Георгию Исаевичу Тер-Степаняну (1907–2006), который был активным участником его работы и возглавлял оползневую комиссию.

Abstract

The publication continues the series of articles by V.S. Shibakova about the Scientific Council of the AS USSR on Engineering Geology and Hydrogeology and about scientists who were associated with it. The paper is devoted to the academician Georgiy Isayevich Ter-Stepanyan (1907–2006) who was a member of the council, an active participant of its work and the head of its Landslide Commission.

SHIBAKOVA V.S.

A senior staff scientist of the Geological Institute of the RAS, candidate of science (Geology and Mineralogy), Moscow, valentina-shibakova@yandex.ru

Key words:

engineering geology; academician G.I. Ter-Stepanyan; Scientific Council of the AS USSR on Engineering Geology and Hydrogeology.



Рис. 1. Член-корреспондент Академии наук Армянской ССР, академик Национальной академии наук Республики Армения Г.И. Тер-Степанян (1907–2006)

Член-корреспондент Академии наук Армянской ССР (АН АрмССР) и академик Национальной академии наук Республики Армения (НАН РА) Георгий Исаевич Тер-Степанян в числе других выдающихся инженеров-геологов СССР вошел в 1966 г. в первый состав Научного совета АН СССР по инженерной геологии и грунтоведению (позже гидрогеологии) и активно участвовал в работе совета на всех этапах его деятельности (1966–1991 гг.).

Г.И. Тер-Степанян, будучи широко известным ученым в области геомеханики и реологии, занимался изучением оползней. Он явился инициатором создания оползневой комиссии в составе Научного совета, которую бессменно возглавлял два десятилетия. Комиссия осуществляла координацию научных исследований в стране по оползневой тематике, разрабатывала предложения к перечню основных направлений инженерно-геологических исследований. Георгий Исаевич очень



Рис. 2. Советские ученые в Париже во время 1-го Конгресса МАИГ: а — впереди стоит спиной А.Г. Лыкошин, дальше слева беседуют Г.И. Тер-Степанян и В.С. Шibaкова, справа подходит Г.А. Мавлянов; б — справа налево: Ф.В. Котлов, И.Г. Коробанова, А.Г. Лыкошин, В.С. Шibaкова (площадь Согласия, Париж, сентябрь 1970 г.)

удачно сформировал ее состав, пригласив в нее представителей ведущих институтов в области инженерной геологии, в которых разрабатывалась оползневая тематика, из многих регионов Советского Союза. Так, его заместителем многие годы был один из ведущих «оползневиков» страны В.В. Кюнтцель (ВСЕГИНГЕО, Россия), ученым секретарем — И.О. Тихвинский (ПНИИИС, Россия), активными членами комиссии — З.Г. Тер-Мартirosян (МИСИ, Россия), В.С. Федоренко (МГУ, Россия), С.Р. Месчан (Армения), Р.А. Ниязов (Узбекистан), М.Г. Демчишин (Украина), В.Я. Степанов (Киргизия), Д.В. Чхеидзе (Грузия), Э.Д. Церетели (Грузия) и др. Оползневая комиссия проводила свою работу в тесном сотрудничестве с селевой комиссией Научного совета, а также с региональными секциями Украины, Средней Азии и Казахстана и была одной из самых эффективных в его составе. Она ежегодно проводила научно-технические совещания, симпозиумы, школы-семинары по различным вопросам с участием заинтересованных специалистов в различных регионах страны. Назову лишь некоторые: симпозиум по теории оползневой процесса в г. Дилижане Армянской ССР (май 1973 г.); Всесоюзное научно-техническое совещание «Оценка устойчивости склонов и инженерная защита оползнеопасных территорий» в г. Киеве (1987 г.); симпозиум «Сейсмогенные оползни и сели и их инженерно-геологическое изучение» в г. Душанбе (сентябрь 1988 г.); симпозиум «Геодинамика склонов и проблемы рационального использования геологической среды» в г. Москве (сентябрь 1989 г.). Хотелось бы отметить, что ученый секретарь комиссии Игорь Олегович Тихвинский был ведущим специалистом ПНИИИС по оползневой тематике, доктором геолого-минералогических наук, активным помощником Г.И. Тер-Степаняна, для которого его ранний уход из жизни был невосполнимой утратой.

Одновременно Георгий Исаевич был активным членом Международной ассоциации по инженерной геологии и охране окружающей среды (МАИГ), проводил большую международную научно-организационную работу. Он был членом комиссии МАИГ по оползням, а также сопредседателем комиссии по терминологии (совместно с А. Шедмоном). В 1970 г. Г.И. Тер-Степанян участвовал в составе советской делегации в работе 1-го Конгресса МАИГ в Париже. В 1971 и 1974 гг. оползневая комиссия Научного совета активно работала

на симпозиумах ассоциации в Москве. В 1977 г. Георгий Исаевич возглавлял советскую делегацию на Симпозиуме МАИГ в Праге, в 1979 г. был участником Симпозиума МАИГ в Тбилиси, в 1984 г. — 27-го Международного геологического конгресса (МГК) в Москве, в 1994 г. — 7-го Конгресса МАИГ в Лиссабоне. На этих мероприятиях Г.И. Тер-Степанян выступал с научными докладами, участвовал в дискуссиях, в подготовке ре-



Рис. 3. Заседание Международного симпозиума МАИГ в Москве в 1971 г. (гуманитарный корпус МГУ, 1971 г., фото В.И. Васильева)



Рис. 4. В кулуарах заседания Симпозиума МАИГ в Москве в 1974 г. Слева направо: секретарь оползневой комиссии И.О. Тихвинский, Г.И. Тер-Степанян, Д.В. Чхеидзе (МГУ, 1974 г., фото В.И. Васильева)

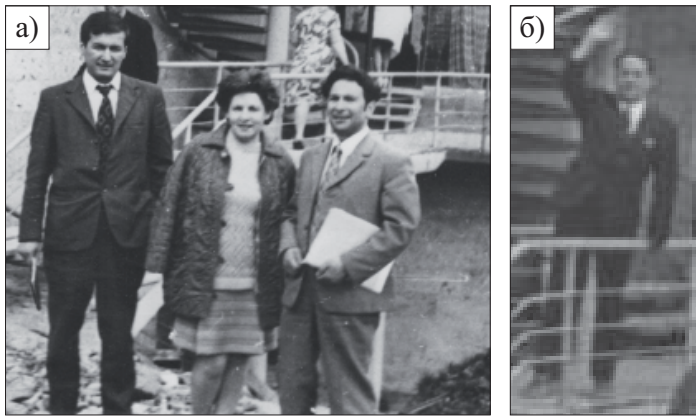


Рис. 5. Участники Всесоюзного симпозиума по теории оползневой деформации: а — слева направо: Р.А. Ниязов, И.А. Моссаковская, К.Ш. Шадунц; б — заместитель председателя оползневой комиссии В.В. Кюнтцель (г. Дилижан, Армения, май 1973 г.)

шений. Как правило, к этим форумам приурочивались заседания комиссий Научного совета и МАИГ, что обеспечивало возможность встречаться с коллегами лично, а не общаться только по переписке.



Рис. 6. Зал заседаний Международного симпозиума МАИГ в Праге в 1977 г. Во втором ряду слева направо: В.Я. Степанов, И.М. Буачидзе, неизвестная автору чехословацкая участница симпозиума, сзади которой сидит Г.И. Тер-Степанян, а слева от него — В.С. Шибакова



Рис. 7. Прием на Симпозиуме МАИГ в Праге в 1977 г.: Г.И. Тер-Степанян и Д. Варнес (впоследствии председатель комиссии МАИГ по оползням)

Представляется целесообразным познакомить читателя с некоторыми работами Г.И. Тер-Степаняна. В статье «Анализ оползневых деформаций зданий и инженерных сооружений» [3] он писал: «Неоценимую помощь в изучении оползней, находящихся в подготовительной фазе глубинной ползучести, оказывает анализ различных оползневых деформаций — трещин, смещений, разрывов и т.д.». Георгий Исаевич указал, что в отличие от геодезических наблюдений при исследовании оползня, результаты которых дают информацию об абсолютных смещениях разных его точек, анализ деформаций сооружений, находящихся на оползневом склоне, дает сведения об относительных смещениях непосредственно примыкающих друг к другу участков оползня. Анализируя эти деформации, опытный специалист, хорошо знающий теорию строительных конструкций, может получить ясное представление о ходе оползневой деформации и предсказать ее дальнейшее развитие. При таком анализе имеют значение расположение, размеры, конструкция, материал сооружения. Зная время строительства и ремонтных работ, можно восстановить историю развития оползня.

Далее Г.И. Тер-Степанян привел разработанную им шестибалльную классификацию оползневых деформаций по их величине. Сооружения различных типов по-разному реагируют на деформации грунтов. Одни сооружения (например, каменные бордюры на цементном растворе) «чутко обнаруживают» самые незначительные деформации (баллы I, II), а другие (например, жесткие железобетонные плиты) остаются невредимыми при значительных смещениях грунта (баллы IV, V). Георгий Исаевич выделил следующие типы сооружений на склонах с точки зрения их способности реагировать на первичные оползневые трещины в грунте и сохранять эту информацию: (1) податливые, (2) гибкие, (3) составные, (3) сборные, (4) жесткие, (4) комбинированные. Далее он привел примеры всех шести типов сооружений и описал их реакции на оползневые деформации. Г.И. Тер-Степанян сделал вывод, что шестибалльная классификация оползневых деформаций по их величине и выделение шести типов сооружений по их деформируемости дают исследователям основу, необхо-



Рис. 8. Прогулка по Праге во время Симпозиума МАИГ в Праге в 1977 г. Слева направо: Г.И. Тер-Степанян, В.С. Шибакова, Я. Добр, К. Варнес (фото Д. Варнеса)



Рис. 9. Техническая экскурсия по Моравии во время Симпозиума МАИГ в Праге в 1977 г.: а — участники экскурсии; б — характерный пейзаж

димую для использования такого важного источника информации, как оползневые деформации сооружений.

Материал, изложенный в статье [3], был доложен Г.И. Тер-Степаняном на 1-м Конгрессе МАИГ в Париже в 1970 г. В совершенстве владея английским языком, Георгий Исаевич сумел донести до аудитории суть своих идей, и его доклад имел большой успех.

В статье «Некоторые проблемы дальнейшего развития инженерной геологии в гидротехническом строительстве» [4] обсуждаются результаты инженерно-геологических исследований на территории строительства гидроэлектростанции на реке Роздан в Армении. Г.И. Тер-Степанян показал, что вулканическая активность в верхнем плейстоцене сопровождалась интенсивными землетрясениями, которые привели к образованию оползней на склонах соляных куполов. После этого регион был заполнен лавовыми потоками, которыми оползни были погребены. Тектонические напряжения вызвали смещение осадочных пород и растрескивание лавы. Были проведены работы на гидрогеологических профилях одиннадцати типов на коротком участке каньона. Результаты этих исследований показали, что современная гидрогеологическая ситуация определяется погребенным рельефом осадочных пород, присутствием соляных куполов, наличием края синклинали, различной фильтрационной способностью лав, наличием озерных отложений, а также разнообразной глубиной флювиального подреза склонов. В статье [4] отмечено обрушение кровли деривационного туннеля в процессе строительства, поскольку он был спроектирован без учета вышеупомянутых условий. Георгий Исаевич приходит к следующему выводу: «Проведение специальных крупномасштабных исследований на малых площадках является необходимым условием для выполнения объема инженерно-геологических работ в районах со сложной природной обстановкой, и в особенности в молодых горно-складчатых регионах». Отсылаю заинтересованного читателя к этому интересному материалу, опубликованному на английском языке в трудах Симпозиума МАИГ 1979 года в Тбилиси.

В 1993 г. Г.И. Тер-Степанян опубликовал большую статью «Оползневая терапия» [1], в которой указал, что предполагается новый подход к решению задач противооползневой защиты. В методическом отношении он обратился к опыту медицины и, используя ее терминологию, описал определенную этапность проектирования и осуществления инженерной защиты, при которой защитные мероприятия на каждом следующем этапе назначаются или

корректируются в зависимости от степени стабильности склона, достигнутой на предыдущей стадии. Эта идея дает возможность более рационального укрепления оползневых склонов. Статья [1] содержит значительный фактический материал и рисунки, отражающие типы составных и сложных оползней. В ней приводится предлагаемая Г.И. Тер-Степаняном классификация оползневых трещин, основанная на признаках вызвавших их напряжений, дается схематическая трещинная карта, отображающая оползневую зону, которая начинается с двух самостоятельных цирков, разделенных межоползневым гребнем. На деформируемом склоне Георгием Исаевичем описаны восемь типов трещин. В заключение сделан вывод, что для стабилизации склона достаточно изменить «оползневый баланс» таким образом, чтобы устранить его ползучесть. Предложен наблюдательный метод «лечения» склонов, применение которого, по мнению Г.И. Тер-Степаняна, следует начинать как можно раньше, желательно при появлении первых «симптомов» глубинной ползучести. Специфическая область применения этого метода — крупные упорные старые оползни, систематически находящиеся в состоянии глубинной ползучести, а временами и в катастрофической. Георгий Исаевич высказал мнение, что в будущем лечение таких склонов будет осуществляться с применением предложенного метода, добавив, что приближение этого будущего зависит от нас самих.



Рис. 10. Секретарь оползневой комиссии Научного совета И.О. Тихвинский во время Симпозиума МАИГ в Праге в 1977 г.



Рис. 11. Участники Симпозиума МАИГ в Тбилиси в сентябре 1979 г. на гребне плотины во время экскурсии на Ингури-ГЭС. Слева направо: Г.И. Тер-Степанян, А.А. Сабалюскас, В.С. Шibaикова, К.Г. Пшеничников

Далее я остановлюсь еще на одной яркой странице в биографии Г.И. Тер-Степаняна. Георгию Исаевичу выпала роль быть защитником своей родины — Армении — от грозившей ей экологической катастрофы. Много лет спустя эти события были описаны Георгием Исаевичем в статье [2], в которой он рассматривает вопрос о строительстве могильника радиоактивных отходов в Армении в 1983 году. «Бредовая идея, воплощенная в официальные документы, заключалась в предложении построить могильник радиоактивных и высокотоксичных отходов в Араратской равнине на участке, расположенном рядом с АЭС с востока. Могильник намечалось устроить в отложениях каменной соли, залегающих под артезианскими водами на глубине 800 м». Далее Георгий Исаевич показывает, что соляные отложения в Армении не удовлетворяют требованиям строительства, предъявляемым в мировой практике к такого рода объектам. Он также показывает, что способ создания подземной камеры путем подземного размыва соляных отложений



Рис. 12. Участники 27-го Международного геологического конгресса в перерыве заседания инженерно-геологической секции на балконе гуманитарного корпуса МГУ. Сидят слева направо: Р. Оливейра, А. Петер, В.И. Осипов, Н. Ренгерс, В. Дирман, Л. Примель, неизвестный автору, Д. Прайс, П. Маринос. Стоят в первом ряду слева направо: Г.И. Тер-Степанян, Х. Ниини, М. Матула, Л.В. Бахирева, М. Лангер, Е.Е. Яранцева, неизвестный автору, В.С. Шibaикова, Х. Ремолди, Ванг Сиджинг, Г. Ройтер (г. Москва, 1984 г.)

явился бы катастрофой: «Образуется несколько сот тысяч кубических метров рассола, который собирался бы в искусственном пруду для выпаривания. После выпаривания воды часть соли была бы разнесена ветром по Араратской равнине, отравляя и уничтожая растительность, а большая часть проникла бы через проницаемые грунты и трещиноватые лавы, достигла артезианских вод и сделала бы их непригодными для использования. Экологические последствия такой технологии создания камеры были бы катастрофичны, и только злой гений мог ее предложить». Г.И. Тер-Степанян показывает, как Армении удалось избежать этой трагедии, и с большой благодарностью вспоминает тех, «кто решительно вмешался и помог остановить этот чудовищный проект».

31 мая 1985 г. Г.И. Тер-Степанян выступил с докладом об Армянской АЭС на заседании Отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук АН СССР (членом которого являлся академик Е.М. Сергеев). «Строго говоря, это отделение не должно было меня выслушать, т.к. такое обращение должно было исходить от Академии наук Армении, а я был для них частным лицом, однако академик-секретарь АН СССР Б.С. Соколов не почитался с такой формальностью. В повестке дня Армянская АЭС не была названа, и вопрос обсуждался как отвлеченный научный доклад. Мой доклад был сочувственно выслушан и одобрен». По этому докладу была принята следующая предложенная Г.И. Тер-Степаняном формулировка решения: «Строительство атомных станций и подземных могильников отходов при них путем размыва камер в соляных пластах недопустимо, если соляные пласты подвержены соляной тектонике, если они расположены над используемыми для водоснабжения или орошения артезианскими водами, если они находятся в сейсмоактивных зонах, разбиты разломами или прорезаны вулканическими жерлами». Все названные запреты полностью относятся к Армянской АЭС. Далее Г.И. Тер-Степанян показывает, какие еще потребовались усилия, чтобы не допустить осуществления проекта. К событиям о закрытии проекта строительства могильника радиоактивных отходов в Армении наш совет был причастен в значительной мере. Известно, что нет пророка в своем отечестве, поэтому Научный совет организовал визит М. Лангера в СССР в 1987 г., пригласив его выступить с лекциями в Москве и Ереване. Профессор М. Лангер — президент МАИГ, сотрудник Федеральной геологической службы Германии в Ганновере (BGR), член комиссии МАИГ по захоронению отходов — являлся ведущим специалистом в мире по строительству хранилищ радиоактивных отходов в соляных отложениях. Первая лекция М. Лангера прошла в Москве в МГУ. В ней он изложил концепцию строительства подобных объектов, принятую в ФРГ, и рассказал об опыте успешного строительства хранилища в соляных отложениях на северо-востоке Германии по государственной программе «Горлебен». Эту лекцию в МГУ переводила я и хорошо видела, с каким напряженным вниманием слушал ее Е.М. Сергеев.

Г.И. Тер-Степанян являлся инициатором организации лекции М. Лангера в Геологическом институте АН АрмССР в Ереване. Ее тематика была животрепещущей для широкого круга геологов и других специалистов в связи с проектом строительства могильника радиоактивных отходов на Араратской равнине. В поездке в



Рис. 13. Профессор М. Лангер выступает в МГУ с лекцией о строительстве подземных хранилищ высокотоксичных и радиоактивных отходов. Переводчик — В.С. Шибакова (г. Москва, 1987 г., фото О.Г. Батановой)

Армению М. Лангера сопровождала автор этих строк. Я присутствовала на лекции М. Лангера в Ереване (которую переводил Георгий Исаевич) и прекрасно помню, как искусно он перешел от опыта строительства хранилища в своей стране к описанию специфических геологических условий Армении, обсудил все особенности и сделал вывод: «Здесь строить хранилище нельзя». Помню, какой радостью были охвачены присутствовавшие на лекции ученые и как сияло лицо Георгия Исаевича. Вскоре Е.М. Сергеев направил письмо президенту АН Армянской ССР академику В.А. Амбарцумяну о недопустимости строительства могильника радиоактивных отходов в Армении. И этот вопрос был благополучно закрыт. Данный пример показывает, как важно международное сотрудничество ученых в предотвращении экологических бедствий.

Последняя статья Г.И. Тер-Степаняна является как бы его завещанием армянскому народу о путях снабжения республики электроэнергией. Г.И. Тер-Степанян ратует за переход к более чистым альтернативным источникам энергии, в частности ветру. «Ветроэнергетику следует развивать на малонаселенных склонах горы Арагац, где ветры чаще и сильнее. На склонах устанавливаются ветровые двигатели, электрический ток попадает в сеть. В Армении могут быть найдены и другие участки расположения ветряных двигателей, где возможно сделать поступление ветроэнергии более равномерным. Работа контролируется системой суточного регулирования других источников энергии, например гидравлической (ГЭСы). Технология изготовления ветряных двигателей сравнительно несложна и вполне осуществима в Эчмиадзине на заводе пластмасс и в Ереване на электротехнических заводах. К изготовлению и установке ветряных двигателей можно приступить уже теперь, не дожидаясь 2016 года, и начать увеличение электроснабжения Армении. Будем надеяться, что руководство Республики Армения с должным вниманием отнесется к вышеизложенному» — таков наказ Г.И. Тер-Степаняна — ученого, гражданина и патриота.

Г.И. Тер-Степанян прожил плодотворную и долгую жизнь, работая до последнего дня. Он умер 4 декабря 2006 года, четыре месяца не дожив до своего столетия. За несколько месяцев до кончины Георгия Исаевича им была завершена статья, которая цитировалась мною выше [2]. В этой статье он подводит также итог своей многолетней борьбы против строительства второй очереди Армянской АЭС и делает свое программное заявление

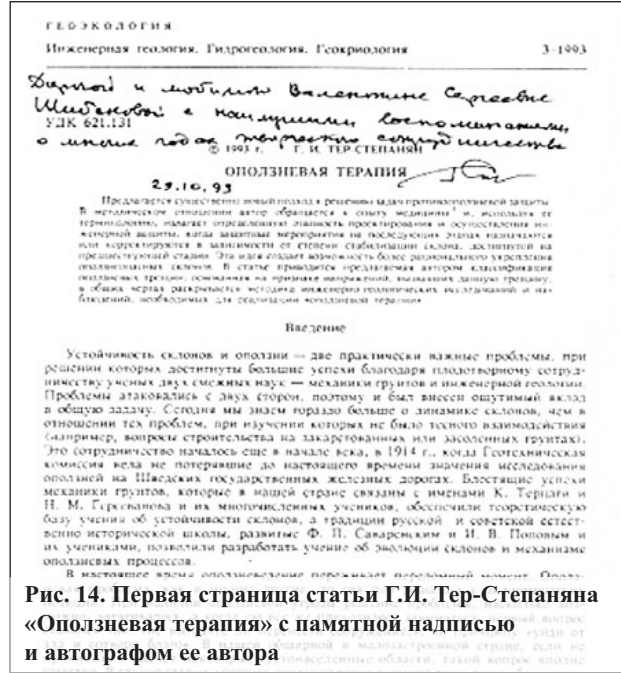


Рис. 14. Первая страница статьи Г.И. Тер-Степаняна «Оползневая терапия» с памятной надписью и автографом ее автора

о необходимости перехода к альтернативным источникам энергии в стране.

В заключение я хочу отметить, что Георгий Исаевич был замечательным человеком, доброжелательным, отзывчивым. У него была прекрасная семья. Его жена Асмик Елисеевна была ему надежной помощницей во всех делах, окружала его заботой и вниманием. Они гостеприимно и радушно принимали дома друзей, приезжавших в Ереван. Такой же отзывчивостью отличались и их дочери-красавицы. Когда Георгий Исаевич овдовел, дочери взяли на себя заботу об отце, оберегали его здоровье, создавая ему возможность продолжать научную и организационную работу и жить деятельно до глубокой старости. Во время совместных поездок мне посчастливилось вместе с Георгием Исаевичем посещать музеи в Париже, Праге, Братиславе, Ереване, осматривать исторические памятники, и я поражалась, какими глубокими познаниями обладал Георгий Исаевич в живописи, скульптуре, архитектуре. Свойственный ему тонкий вкус указывал, что он был настоящим эстетом.

Заканчивая свою статью, я выражаю надежду, что армянские коллеги напишут книгу о крупном ученом, замечательном человеке и долгожителе — Георгии Исаевиче Тер-Степаняне, выдающемся сыне армянского народа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тер-Степанян Г.И. Оползневая терапия // Геоэкология. 1993. № 3. С. 82–93.
2. Тер-Степанян Г.И. Что произойдет в Армении после строительства второй атомной станции (написана 26 июля 2006 г.) // Голос Армении. 04.06.2009. URL: <http://www.armtown.com/news/ru/gol/20090604/46521/>.
3. Тер-Степанян Г.И., Тер-Степанян А.Е. Анализ оползневых деформаций зданий и инженерных сооружений // Вопросы инженерной геологии: доклады советских ученых к конгрессу МАИГ. М.: Изд-во ВИНТИ, 1970. С. 214–222.
4. Ter-Stepanian G., Arakelian A. Some problems of further development of engineering geology for hydrotechnical construction // Bulletin of the IAEG. Tbilisi, USSR, 1980. № 21. P. 222–224.



МИГРАЦИОННЫЕ БУГРЫ ПУЧЕНИЯ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ КРИОЛИТОЗОНЫ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

PALSAS IN THE SOUTHERN PART OF THE MIDDLE SIBERIA PERMAFROST ZONE

ВАСИЛЬЧУК Ю.К.

Профессор географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ), д.г.-м.н., действительный член Российской академии естественных наук, г. Москва, vasilch@geol.msu.ru, vasilch_geo@mail.ru

ВАСИЛЬЧУК А.К.

Старший научный сотрудник географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.н., г. Москва

БУДАНЦЕВА Н.А.

Старший научный сотрудник географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.г.н., г. Москва

ЙОШИКАВА К.

Профессор Центра исследований водного пространства и окружающей среды Института северной инженерии Университета Аляски, г. Фэрбенкс, штат Аляска, США

ЧИЖОВА Ю.Н.

Старший научный сотрудник географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.г.н., г. Москва

СТАНИЛОВСКАЯ Ю.В.

Научный сотрудник лаборатории геоэкологии Института геоэкологии РАН им. Е.М. Сергеева, г. Москва

VASIL'CHUK YU.K.

Professor of the faculty of geography of the Lomonosov Moscow State University (MSU), doctor of science (Geology and Mineralogy), member of the Russian Academy of Natural Sciences, Moscow, vasilch@geol.msu.ru, vasilch_geo@mail.ru

VASIL'CHUK A.C.

Senior staff scientist of the geography faculty of the MSU, doctor of science (Geography), Moscow

BUDANTSEVA N.A.

Senior staff scientist of the Geography Faculty of the MSU, Ph.D. (candidate of science in Geography), Moscow

YOSHIKAWA K.

Professor of the Water and Environmental Research Center of the Institute of Northern Engineering of the University of Alaska, doctor of science, Fairbanks, Alaska, the USA

CHIZHOVA JU.N.

Senior staff scientist of the geography faculty of the MSU, Ph.D. (candidate of science in Geography), Moscow

STANILOVSKAYA JU.V.

Research associate of the Geocryology Laboratory of the Sergeev Environmental Geoscience Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Ключевые слова:

криолитозона; миграционные бугры пучения; крупнобугристые торфяники; Средняя Сибирь; Северный полярный круг.

Key words:

permafrost zone; palsa; peat bogs; Middle Siberia; Arctic circle.

Аннотация

В статье рассмотрены особенности развития миграционных торфяных бугров пучения в южной части криолитозоны Средней Сибири. Показано, что южный предел их ареала совпадает с южной границей распространения многолетнемерзлых грунтов в этом регионе и находится на западе южнее 55° с.ш., а на востоке — близ широты 56° с.ш. Отмечено, что миграционные бугры пучения существенно осложняют эксплуатацию трубопроводов, дорог, крупных объектов строительства, аэродромов.

Введение

Образование и деградация сильноольдистых бугров пучения — это весьма опасные процессы для железных и шоссейных дорог, взлетных полос аэродромов, нефте- и газопроводов, зданий и др. [3, 6–9, 14, 26, 27, 31–33, 36, 43]. В настоящее время в южной части криолитозоны Средней Сибири нет ни одного протяженно-го линейного сооружения, которое не подвергалось бы воздействию морозного пучения. Это особенно важно в условиях наблюдающейся в последние годы активизации промышленно-гражданского строительства на данной территории (рис. 1).

1. Особенности инженерно-геологического освоения территории

По данным Минпромэнерго, добыча нефти в Средней Сибири вырастет на несколько десятков миллионов тонн в год за счет начала промышленной добычи на таких крупных месторождениях, как Юрубчено-Тохомское, Куюмбинское, Верхнечонское, Талаканское. (см. рис. 1). Промышленная добыча газа в Средней Сибири начинается на наиболее подготовленных к эксплуатации месторождениях.

Abstract

The article considers the palsa development features in the southern part of the Middle Siberia permafrost zone. It is shown that the southern limit of their areal coincides with the southern boundary of the permafrost zone and is located southward of 55° N in the west of the region and near 56° N in the east. It is noted that palsa greatly complicate exploitation of pipelines, roads, major construction projects and airfields.



Начало промышленной эксплуатации Юрубчено-Тохомского и Куомбинского месторождений связано со строительством нефтепровода Юрубчен — Кучеткан протяженностью 311 км, который свяжет месторожде-

ния с железнодорожной веткой Карабула — Решоты в районе станции Кучеткан. Далее предполагается продолжение нефтепровода до места врезки в существующую систему трансибирских магистральных нефте-

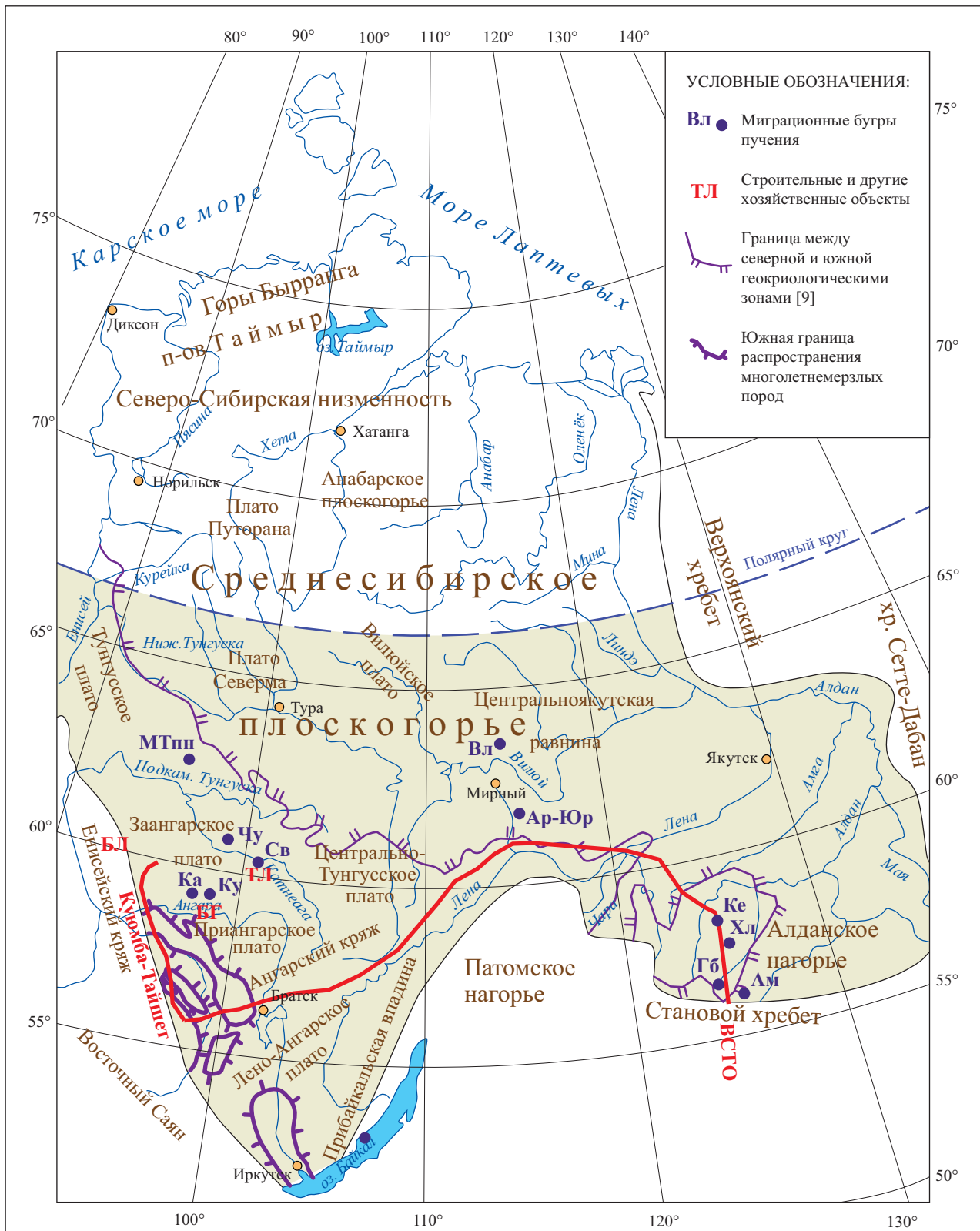


Рис. 1. Карта-схема. Массивы многолетнемерзлых миграционных торфяных бугров: Ам — в районе озера Амутычи; Ар-Юр — в пойме реки Аргаа-Юрэх по трассе дороги Ленск — Мирный; Вл — к северу от долины реки Вилюй; Гб — в долине реки Горбыллах; Ка — в долине реки Карабула; Ке — в долине реки Керак; Ку — в долине реки Кунчет; МТпн — в междуречье рек Подкаменная Тунгуска и Нижняя Тунгуска; Св — в Суловской воронке; Хл — в долине реки Халдя; Чу — в междуречье рек Чуния и Подкаменная Тунгуска. Инженерно-геологические объекты: БГ — Богучанская ГЭС; БЛ — месторождение Благодатное; ВСТО — трубопровод Восточная Сибирь — Тихий океан; ТЛ — месторождение Тальское

проводов в районе подстанции Нижняя Пойма. На этом этапе возможно включение в разработку значительных ресурсов нефти Собинского месторождения и окружающих его перспективных участков Собинско-Тэтэринского района. Для транспортировки добываемой нефти предполагается строительство нефтепровода Собинское — Кучеткан протяженностью 380 км, синхронизированное с достройкой нефтепровода Кучеткан — Нижняя Пойма.

Освоение газоконденсатных месторождений Эвенкии планируется начать уже в 2013 году. В программу освоения газовых ресурсов предполагается вовлечь базовые Юрубчено-Тохомское и Собинско-Пайгинское месторождения, расположенные в зоне действия планируемых газопроводов, путем строительства через территорию Нижнего Приангарья газопроводов-подключений. Первоочередным объектом добычи газа может стать Нижнеангарский газодобывающий район. На этом этапе предполагается построить газопровод от Агалеевского и Берямбинского месторождений до поселка Богучаны.

В ближайшие 3–4 года будет построен газопровод от Юрубчено-Тохомского и Оморинского месторождений до поселка Богучаны. Для начала промышленной добычи газа в Собинско-Тэтэринском районе планируется через 2–3 года соединить его газопроводом с газопромислами Нижнеангарского района.

Особенностью освоения газоконденсатных месторождений Эвенкии и Нижнего Приангарья является проблема извлечения гелия. В связи с этим при любом из сценариев освоения газовых ресурсов Восточной Сибири и Дальнего Востока в Нижнем Приангарье необходимо строительство завода по переработке газа с выделением гелия, этана, а также хранилищ для хранения гелиево-азотного концентрата. В качестве базового для создания газоперерабатывающего производства выбрано Собинское месторождение — крупнейшее по разведанным запасам свободного газа. Для строительства завода по переработке газа могут быть использованы Богучанский район, территория поселка Карабула. В районах размещения газоперерабатывающего завода целесообразно строительство подземных хранилищ гелия в резервуарах в каменной соли методом подземного растворения. Помимо искусственных резервуаров для хранения гелиевого концентрата могут быть использованы и природные ловушки газа. В варианте строительства завода в районе поселка Карабула газ с месторождения будет подаваться на это предприятие по газопроводу протяженностью 400 км, другая часть будет вместе с сухим метаном закачиваться в газопровод Карабула — ЕСГ (Нижняя Пойма) протяженностью 200 км. В районе железнодорожной станции Карабула предполагается создание соответствующих резервуарных (подземных хранилищ в соляных пластах) и наливных мощностей.

Юрубчено-Тохомское нефтегазоконденсатное месторождение располагается в юго-западной части Сибирской платформы в пределах Лено-Тунгусской нефтегазоносной области на территории Эвенкийского муниципального района Красноярского края в 280 км к юго-западу от поселка Тура. Собинское нефтегазоконденсатное месторождение располагается в юго-западной части Сибирской платформы в пределах южного

района Лено-Тунгусской нефтегазоносной области. Ближайшим населенным пунктом (40 км) является поселок Ванавара — административный центр Тунгусско-Чунского района Эвенкии (Красноярский край).

В апреле 2012 года Правительством РФ подписано постановление о строительстве нового нефтепровода Куюмба — Тайшет в Красноярской и Иркутской областях, которое обеспечит прием в систему магистральных нефтепроводов ОАО «АК «Транснефть»» нефти с новых месторождений Красноярского края — Куюбинского и Юрубчено-Тохомского. Строительство этого нефтепровода предполагается начать в 2013 г., его длина составит 700 км. Таким образом, новый нефтепровод свяжет Юрубчен с трубопроводной системой Восточная Сибирь — Тихий океан-1 (ТС ВСТО-1).

Эксплуатация трубопроводной системы ВСТО-1 ведется с 2009 года. Транспортировка нефти с температурой от плюс 1 до плюс 6°C начинается с головной нефтеперекачивающей станции (ГНПС) «Тайшет» и проходит вдоль реки Лены и Алданского нагорья и заканчивается на нефтеперекачивающей станции «Сковородино» (НПС-21). Подземный нефтепровод протяженностью 2600 км проложен в зонах сплошного и островного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), характеризующихся высоким разнообразием мерзлотных процессов и явлений, в том числе пучения.

Строительство и эксплуатация подземного трубопровода приводит к нарушению температурно-влажностного режима грунтов на заболоченных землях с бугристым рельефом. Сейчас эти процессы находятся в активной форме, и в связи с эксплуатацией трубопровода, запланированной до 2040 г., необходимо изучать развитие бугров пучения и их взаимодействия с трубопроводом и притрассовой дорогой, поскольку прогнозируется увеличение глубины и площади просядок, а также пучение грунтов.

Для подземного нефтепровода особенно опасны развивающиеся бугры пучения. Это весьма убедительно показано китайскими коллегами на 86-й станции трассы нефтепровода Голмуд — Лхаса на Тибетском нагорье. Здесь бугор пучения образовался во время зимнего промерзания [44] с декабря 2001 г. по март 2002 г. (рис. 2, а). Размеры бугра в январе 2002 г. составляли 15 м в длину, 8–11 м в ширину и 2,0–2,5 м в высоту. К февралю 2002 г. его высота уменьшилась до 1,5–2,0 м (рис. 2, б). Рост бугра вызвал изгибание подземного трубопровода вверх на высоту 1,6 м. Позднее часть нефтепровода возвышалась над поверхностью земли на высоту 1,1 м (см. рис 2, б). В этой опасной ситуации разрыв трубопровода и разлив нефти пока не зафиксированы (рис. 2, в, г), однако они весьма вероятны [44].

В южной части Среднесибирской криолитозоны находятся крупнейшие месторождения: платиноидов (Благотатное на Енисейском кряже — 60°04' с.ш., 92°56' в.д.); железных руд (Нижнеангарское, Ишимбинское, Коршуновское, Нерюндинское, Тагарское и др.); марганцевых руд (Порожихинское — 61°35' с.ш., 90°01' в.д.); полиметаллов (Горевское свинцово-цинковое — 58°07' с.ш., 93°29' в.д.); редких металлов — сурьмы (Раздолинское), магнетитов (Тальское — 60°5'055" с.ш., 101°5'057" в.д.); золота (Олимпиадинское — 59,86° с.ш., 92,91° в.д.) и др.



Для освоения месторождений, доставки леса и пр. предполагается строительство автодорог, особенно в малообжитых местах Эвенкии и соседних районах Красноярского края. Это прежде всего лесовозная автодорога от села Яркино (Богучанский район) до поселка Ванавара (Эвенкия), дороги общего пользования: поселок Ангарский — совхоз Ленина (Кежемский район), Таежный — Ванавара и др.

Запроектировано освоение Селигдарского месторождения апатитов — крупнейшего месторождения фосфорного сырья на Дальнем Востоке России. План создания Селигдарского горно-химического комплекса на территории Алданского района Якутии — одного из составляющих проекта «Комплексное развитие Южной Якутии» — включает в себя строительство на базе месторождения горно-обогатительного комбината (карьера и обогатительной фабрики для получения апатитового концентрата) и химического завода по производству комплексных фосфорно-магниевых удобрений.

Развитие таких промышленных гигантов, как Богучанский алюминиевый завод и др., требует развития всей инфраструктуры районов их расположения, включая дороги и трубопроводы, что неизбежно связано с освоением территорий развития выпуклобугристых торфяников.

Среди важнейших объектов, для которых требуется тщательный учет пучения, — Амуро-Якутская желез-

нодорожная магистраль (АЯМ) и ее новый участок Томмот — Кердем, автодорога Канск — Абан — Богучаны — Кодинск и железная дорога Карабула — Ярки в Нижнем Приангарье.

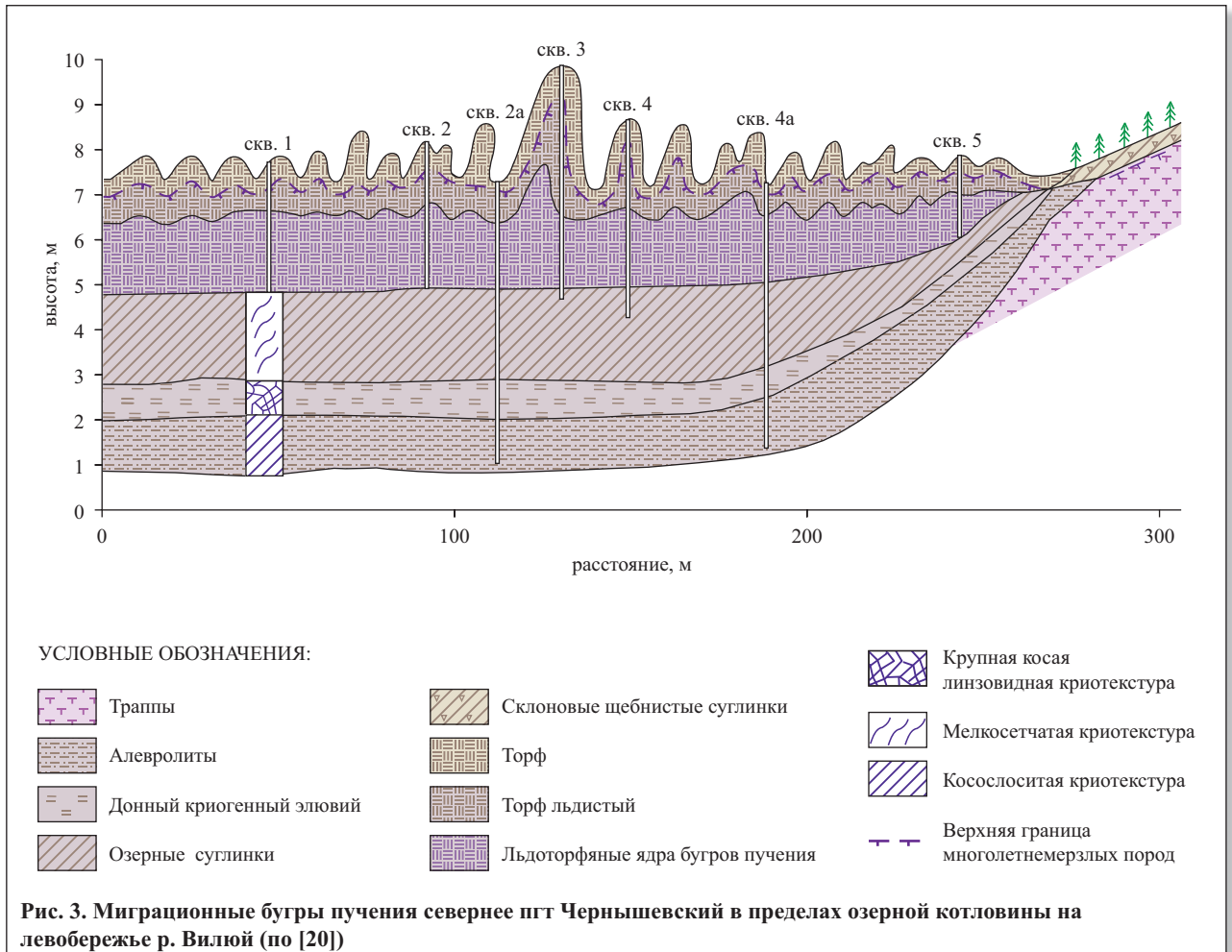
На территории криолитозоны Средней Сибири проектируется и строится ряд крупных гидроэлектростанций: Эвенкийская ГЭС на реке Нижняя Тунгуска, Мамаканская ГЭС, Богучанская ГЭС (58°41'40" с.ш., 99°8'56" в.д.) у г. Кодинска Кежемского района, Мотыгинская ГЭС. Часть сооружений Саяно-Шушенской ГЭС находится на территории островного распространения многолетнемерзлых грунтов. Наличие огромных водохранилищ площадью в тысячи и даже первые десятки тысяч квадратных километров приведет к глубокому оттаиванию подземных льдов под ними, в частности к деградации бугров пучения, а вслед за этим существенно увеличится и глубина самих этих водоемов.

2. Районы распространения миграционных бугров пучения южнее Северного полярного круга

Границы распространения бугристых торфяников в Средней Сибири ранее были обозначены Л.В. Шумиловой [38] и Н.Я. Кацем [13]. Детальные сведения о южном распространении миграционных бугров пучения (пальза) были получены при исследованиях места падения Тунгусского метеорита [2, 16–18, 21, 22 и др.].



Рис. 2. Пульсирующий и мигрирующий бугор пучения и изогнутый нефтепровод на 86-й станции трассы Голмуд — Лхаса на Тибетском нагорье в Китае (по [44]): а — бугор в феврале 2002 г.; б — частично протаявший бугор и нефтепровод в мае 2002 г.; в — изогнутый нефтепровод в июне 2002 г. после того, как бугор полностью растаял; г — изогнутый нефтепровод в июле 2002 г.

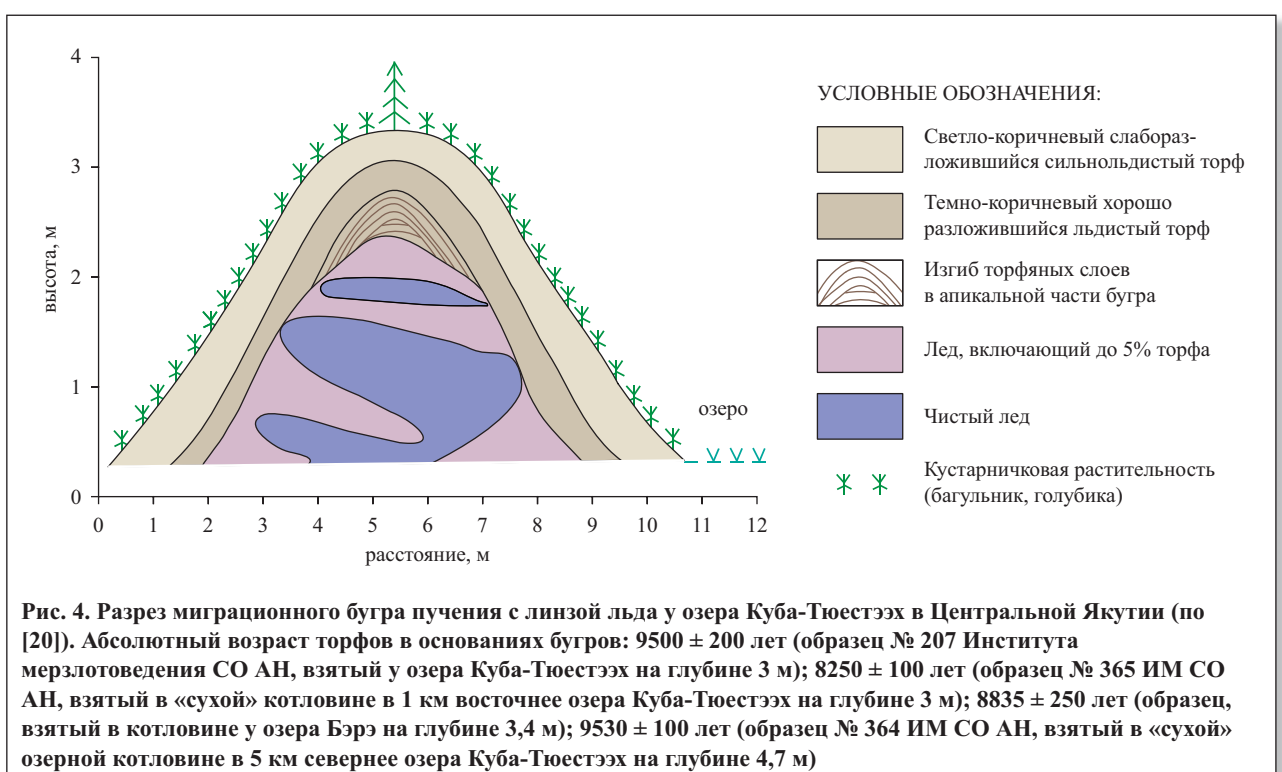


2.1. Миграционные бугры пучения Лено-Вилюйского междуречья

В районах, наиболее близко расположенных к Северному полярному кругу на востоке Средней Сибири, миграционные бугры пучения детально исследованы

В.И. Спесивцевым [20] и Й. Экерманом [39], немного южнее они изучены Н.Г. Бобовым [4].

В.И. Спесивцевым [20] были исследованы бугры пучения в Центральной Якутии в оторфованных озерных котловинах Куба-Тюестээх и Бэрэ (рис. 3, 4) на ле-





вобережье реки Вилюй в 60 км севернее поселка городского типа Чернышевский ($63^{\circ}00'55,86''$ с.ш., $112^{\circ}27'55,68''$ в.д.). Среднегодовая температура грунтов здесь варьирует от минус 8°C (скв. 75-3) до минус 2°C (скв. 75-2, 75-4). Мощность торфа, перекрывающего бугры, варьирует от 1,4 (скв. 75-2) до 3,4 м (скв. 75-8). Торф, как правило, сфагновый, с большим количеством включений веточек и корней кустарников, сильнольдистый, с базальной и тонкошпировой слоистой криотекстурой. Он подстилается светло-серым, зеленовато-серым и синим озерным суглинком мощностью 1,6–2,7 м с крупной линзовидной и косолинзовидной криотекстурой. Толщина линз — до 3–4 см (скв. 75-3). Суглинок подстилается зеленовато-серым и серым с голубоватым оттенком песком мощностью 1,1–3,5 м с массивной и редкошпировой косослоистой криотекстурой [20].

В.И. Спесивцевым [20] также изучены миграционные бугры пучения с линзами льда в озерной котловине Бэре в Центральной Якутии. Мощность торфа в пределах бугров обычно не превышает 3 м. Торф, как пра-

вило, подстилается озерными суглинками, которые, в свою очередь, перекрывают донные табериты. В ядрах палза отмечается высокая льдистость, а иногда даже линзы чистого льда мощностью около 1 м [20].

Й. Экерман [39] исследовал палза в области сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов в Якутии. В некоторых западных и центральных районах Центральной Якутии в октябре 1980 г. и июне 1981 г. были изучены формы, подобные буграм пучения. Большинство наблюдений было сделано с самолета во время полетов между городами Якутск и Мирный.

В полевых условиях Й. Экерманом были изучены бугристые формы в районе города Мирного ($62^{\circ}30'$ с.ш., $114^{\circ}01'$ в.д.) и к северу от поселка городского типа Чернышевский ($63^{\circ}05'$ с.ш., $112^{\circ}30'$ в.д.). Согласно результатам его наблюдений в этих районах бугры очень широко распространены между указанными населенными пунктами и приблизительно в 260 км к северу от них. Этим автором было исследовано 16 болот, в которых встречены бугристые формы пучения [39].

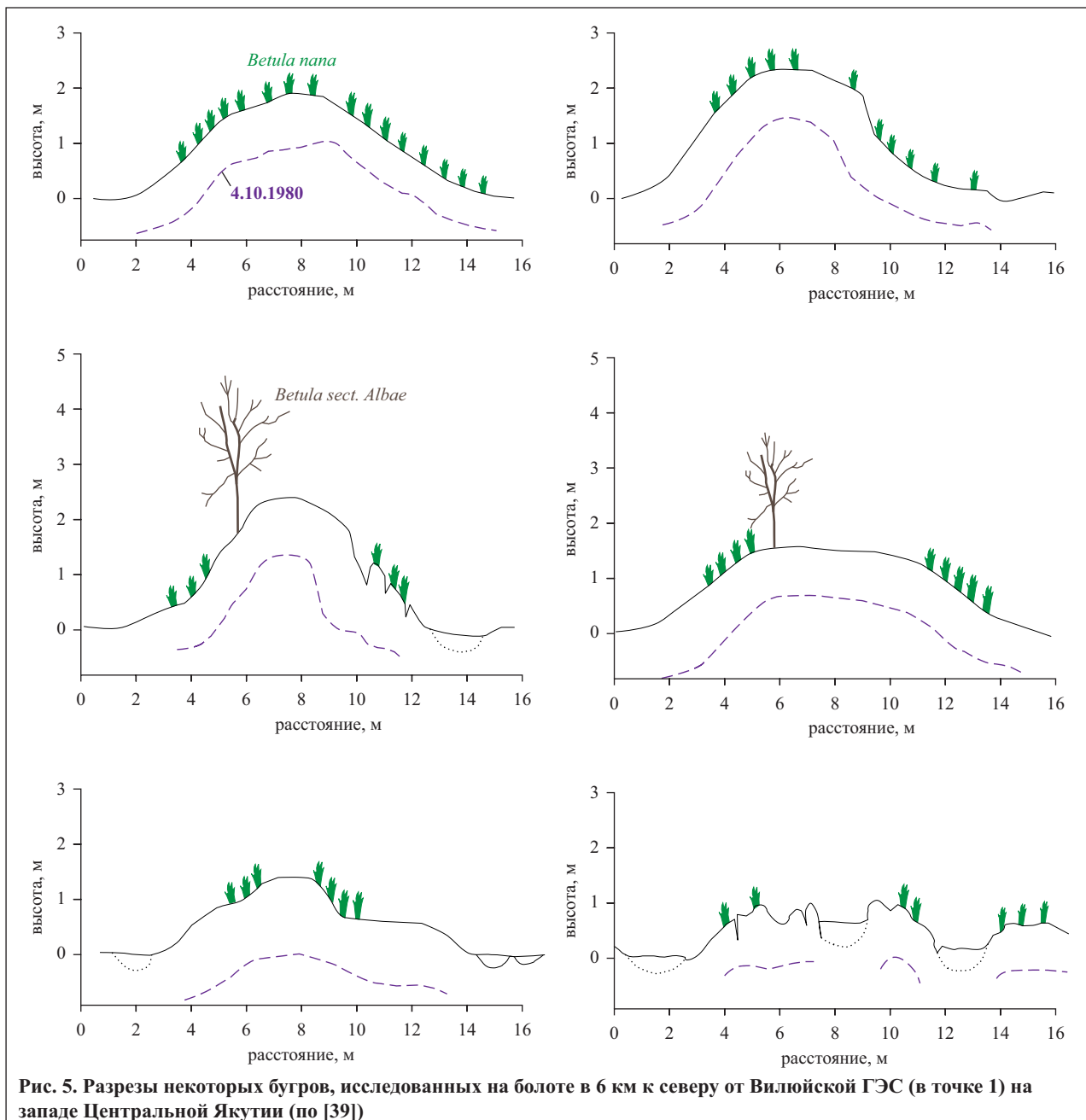


Рис. 5. Разрезы некоторых бугров, исследованных на болоте в 6 км к северу от Вилюйской ГЭС (в точке 1) на западе Центральной Якутии (по [39])

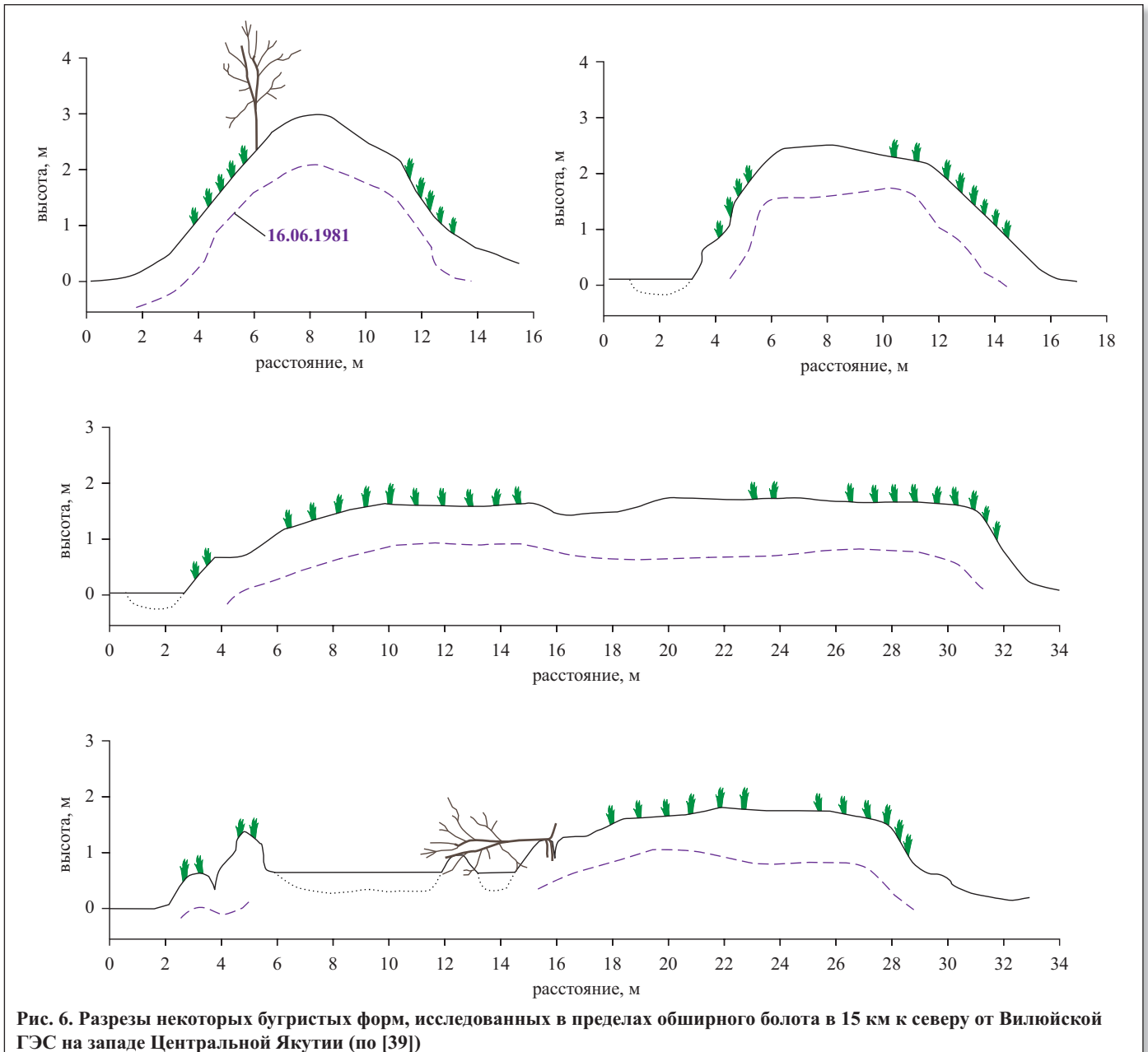


Рис. 6. Разрезы некоторых бугристых форм, исследованных в пределах обширного болота в 15 км к северу от Вилюйской ГЭС на западе Центральной Якутии (по [39])

Детально был исследован многолетнемерзлый торфяник в 6 км к северу от Вилюйской ГЭС. Ширина этого торфяного массива — около 1 км, длина — 3 км, он вытянут с севера на юг. По западному краю болота с севера на юг протекает небольшой ручей. Здесь встречено несколько бугров пучения куполообразной формы высотой от 0,5 до 2,0 м. Диаметр бугров здесь редко превышает 15 м, а их форма является более или менее округлой (рис. 5). Как правило, палыза покрыты кустарниковым покровом, состоящим из карликовой березки (*Betula nana* L.). На некоторых крупных буграх произрастают березы (*Betula sect. Albae*) с максимальным диаметром ствола 13 см. Мощность сезонноталого слоя, измеренная в октябре, — около 1 м. В верхней части бугров залегает очень мощный слой сфагнового торфа. На некоторых зрелых палыза имеются трещины, некоторые бугры находятся на стадии разрушения, расчленены крупными трещинами, блоковой эрозией, термоэрозией (имеют озёрки на вершинах) и термоабразией и т.д. Несколько разрушенных бугров с кольцеобразными водоемами или водоемами, окруженными торфяными кольцами, свиде-

тельствуют о типичном циклическом развитии палыза и окружающих болот [39].

В 15 км к северу от Вилюйской ГЭС (63°02' с.ш., 112°28' в.д.) было исследовано еще одно довольно обширное болото площадью более 5 км². Его центральная часть — довольно увлажненная, в некоторых местах видна открытая вода. Здесь произрастает главным образом осока (*Carex spp.*). Бугры пучения расположены в краевой более сухой части болота. Палыза здесь самых разнообразных форм, включая как выпуклые и платообразные, так и более сложные (рис. 6). Их высота, как правило, 3,5 м и более. В целом они здесь крупнее, чем на других исследованных торфяниках. Кроме того, в пределах данного болота встречаются бугры пучения, находящиеся на разных стадиях развития — от зарождения до разрушения [39].

Образование многолетнемерзлых бугров пучения на Лено-Вилюйском междуречье было описано Н.Г. Бобовым [4]. Наблюдения производились в летние месяцы 1955–1957 гг. по трассе строившейся дороги Мухтуя (ныне Ленск, 60°43' с.ш., 114°54' в.д.) — Мирный (62°32' с.ш., 113°57' в.д.). Бугры пучения бы-



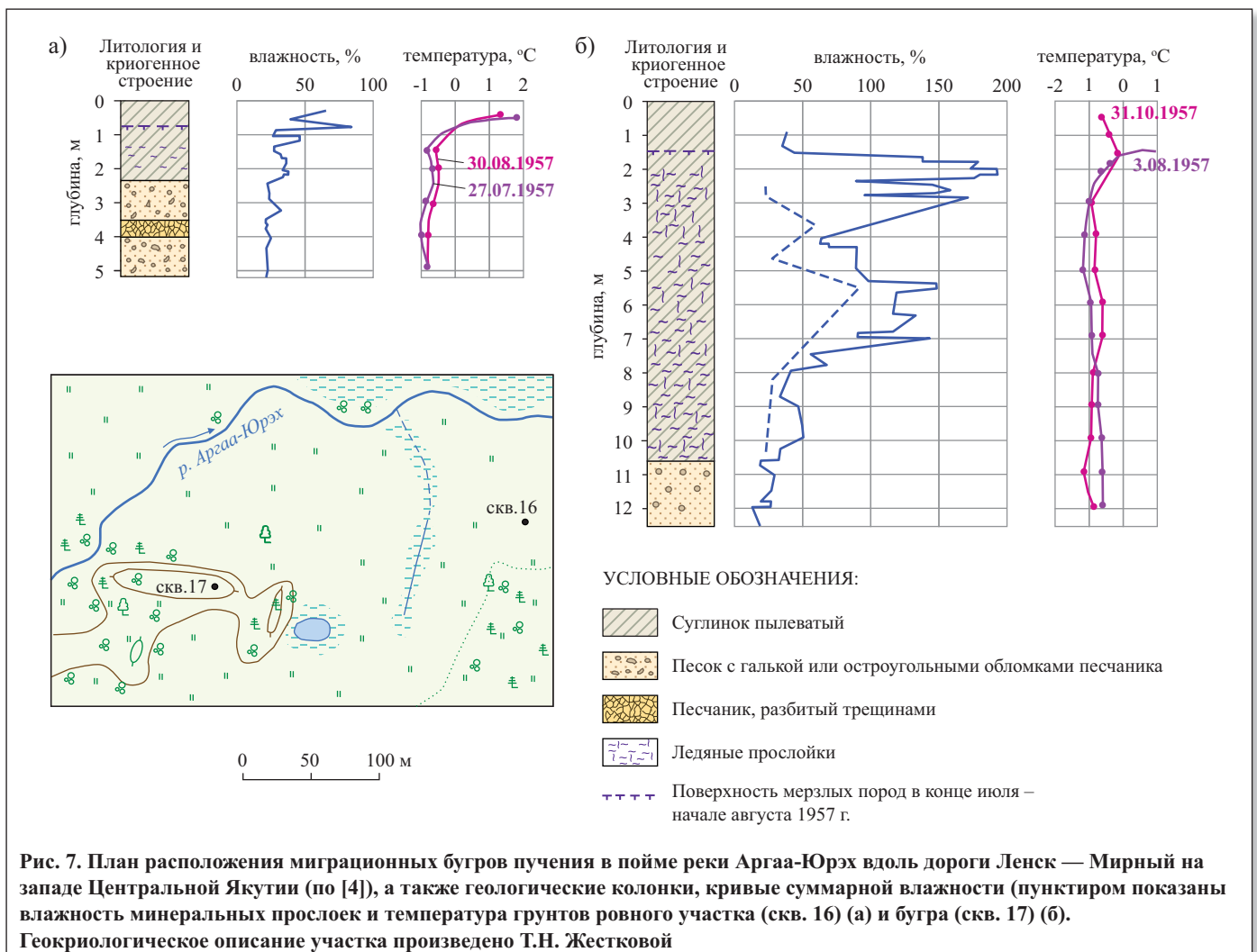
ли встречены этим автором близ осевой части междуречья, в частности в пойме реки Аргаа-Юрэх недалеко от озера Быйыттаах (рис. 7). Пальза здесь отличаются довольно пологими склонами и достаточно крупными размерами, достигая в плане 110 м по длинной и 40 м по короткой оси, и имеют высоту почти 3 м. Бугры четко выражены также благодаря отличающемуся от окружающей местности растительному покрову. На их поверхности имеются густые заросли таволги, кустарников (жимолости, шиповника и др.). На некоторых буграх произрастают отдельные березы и лиственницы. При этом остальная поверхность поймы поросла злаково-осоковым травянистым покровом. Наличие в растительном покрове древесных и кустарниковых видов свидетельствует о многолетнем существовании рассмариваемых пальза. Их развитие на пойме дает основание считать их современными образованиями.

Проведенные Н.Г. Бобовым наблюдения [4] показали, что многолетние бугры пучения, возникающие за счет образования сегрегационного льда при миграции влаги к основанию мерзлого ядра как наиболее охлажденного участка местности, на Лено-Вилуйском междуречье формируются в настоящее время. Рост описываемых бугров происходит в результате неравномерного по площади (дифференцированного) пучения их отдельных частей из-за неодинакового многолетнего промерзания. Дифференцированное пучение отдель-

ных частей пальза обуславливает нарушения в залегании грунтов, дизъюнктивные микродеформации и образование небольших воздушных полостей внутри бугров. Большое число воздушных полостей обуславливает довольно громкие звуки при ударах по буграм или даже ходьбе по ним. На это явление указывали в том числе местные жители.

Один из бугров был исследован более детально [4]. Среднегодовая температура грунтов в нем, измеренная в начале августа, составила минус 0,6°C. Этот бугор сложен пылеватым суглинком мощностью более 10 м, мерзлым с глубины 1,5 м, подстилаемым песком с галькой или остроугольными обломками песчаника. Лед в суглинке находится в виде прослоек (в том числе вертикальных) не толще 2 см, при этом льдистость довольно высокая: в верхней части разреза суммарная весовая влажность по отношению к сухой навеске приближалась к 200% (см. рис. 7, б), что соответствует льдистости около 100%. С глубиной льдистость суглинка уменьшается и уже на глубине 8 м составляет менее 50%. Льдистость подстилающего суглинок песка не превышает 30%. Для сравнения была исследована льдистость участка поймы в стороне от данного бугра. Вскрытые здесь суглинки менее льдистые, их суммарная влажность не превышает 50% и с глубиной также убывает.

Интересной особенностью криогенного строения вышеописанного бугра пучения являлись горизонталь-



но расположенные воздушные полости, окруженные неровными «рваными» поверхностями, расположенными друг от друга не более 1 см по высоте. Их видимая ширина превышает 8 см. В некоторых ядрах при их высоте не более 20 см наблюдалось до трех таких полостей. Вне бугров никаких воздушных полостей установлено не было [4]. В верхней части ядра была обнаружена вертикальная трещина длиной 13 см, заполненная льдом. Нижний конец ее терялся среди прослоек сегрегационного льда. По этой трещине произошло смещение грунтов (дизъюнктивная микродеформация), в результате которой правая часть пород ядра оказалась приподнятой на 2 см. Это отчетливо устанавливается по верхней горизонтальной прослойке, имеющей толщину 1,5 см. Подобные особенности были отмечены и другими исследователями, например Ф. Калмелсом, М. Аллардом и Л. Руссо [6], исследовавшими бугры пучения в Канаде.

По мнению Н.Г. Бобова [4], микросдвиг по вышеупомянутой трещине произошел тогда, когда грунты были уже мерзлыми, и с тех пор они не оттаивали. Он считает, что в результате пучения бугры распадаются системой трещин на блоки, а их поверхность при этом — на полигоны неправильной формы. Отмеченное смещение грунтов происходит в результате неравномерного многолетнего промерзания отдельных частей бугра и дифференцированного пучения. При этом смещения по вертикали могут достигать 0,3 м. При неравномерном пучении отдельных частей многолетних бугров происходит также локальное нарушение залегания и подстилающих талых грунтов. Наиболее интенсивное и дифференцированное пучение в описанном бугре происходило, очевидно, при промерзании верхней 8-метровой толщи грунтов, когда формировалось основное количество ледяных включений. В местах микросдвигов происходило расщепление слоев пород, что обусловило формирование небольших, но довольно многочисленных воздушных полостей. В процессе пучения формировалось температурное поле грунтов бугра, отличное от такового на смежных участках поймы. Глубже температурное поле в подобных условиях выравнивается настолько, что подток влаги к основанию бугра сокращается, и в результате пучение бугра замедляется, а затем и прекращается.

Таким образом, многолетние бугры пучения на Лено-Вилуйском междуречье являются миграционными. При этом их пучение происходит неравномерно вследствие неодинакового многолетнего промерзания, что обуславливает нарушения залегания грунтов, дизъюнктивные микродеформации и микросдвиги и образование небольших воздушных полостей внутри бугров. Неравномерное пучение отдельных частей палеозоя также определяет некоторую рыхлость сложения их многолетнемерзлых грунтов — в результате их суммарная льдистость меньше приращенного объема пород на величину, равную сумме воздушных полостей [4].

2.2. Миграционные бугры пучения междуречья Подкаменной Тунгуски и Нижней Тунгуски

В северо-западных районах Средней Сибири на водоразделе рек Чуны (61° с.ш., $102^\circ 49'$ в.д.) и Подкамен-

ная Тунгуска водораздельные крупнобугристые торфяники распространены на $6-7^\circ$ южнее северной границы лесной зоны [38]. Особенности крупнобугристых торфяников, а именно облесенность бугров и бо-реальный характер покрывающей их растительности, проявляются достаточно четко и на торфяниках южной части Туруханского края.

Одним из ключевых районов для установления южного предела распространения палеозоя в Средней Сибири является территория, в пределах которой в 1908 г. произошло падение Тунгусского метеорита. Бугристые торфяники как в зоне катастрофы, так и вне ее были изучены Л.А. Куликом, Л.В. Шумиловой, Н.И. Пьявченко, Ю.И. Львовым, Е.М. Колесниковым и др. [15–18, 22, 28, 38, 41, 42]. Миграционные бугры пучения высотой 1–2 м встречаются в долине реки Нижняя Тунгуска, в верховьях реки Бахта ($62^\circ 46'$ с.ш., 89° в.д.), на Чуны-Тунгуском междуречье и в районе падения Тунгусского метеорита (с. 277 [10]).

Как сообщают Ю.А. Львов и Г.М. Иванова [17], крупнобугристые комплексы широко распространены на междуречье Подкаменной Тунгуски и Нижней Тунгуски (рис. 8). На борту одного из бугров Ю.А. Львовым и др. [18] описано обнажение, вскрывшее сильнольдистое ядро палеозоя (рис. 9).

- 0–20 см. Торф кирпично-красного оттенка, пылеватой структуры, совершенно сухой, высокой степени разложения, с обрывками листьев мха *Sphagnum magellanicum* Brid. и корешков кустарничков. Это остаток мощного слоя верхового торфа, почти полностью разложившегося в условиях периодического пересыхания.
- 20–58 см. Торф бурого цвета, темнеющий на воздухе. Сложен преимущественно остатками трав (пушицы, вахты) и зеленых мхов (*Drepanocladus* sp. и *Meesia triquetra* Hedw). По мере роста глубины степень его разложения быстро падает с 70 до 50%.
- 58–64 см. Торф черного цвета. На глаз заметны волокнистые остатки растений, в составе которых преобладают зеленые мхи (*Drepanocladus*, *Meesia*). Степень разложения 30%.
- 64–74 см. Торф коричневого цвета, быстро темнеющий на воздухе; волокнистого строения. Сложен остатками зеленого мха *Meesia triquetra* и сфагнового мха из секции *Cimbifolia* (видимо, *Sph. centrale* C. Jens) в почти равных количествах с небольшой примесью остатков хвоща. Степень разложения 25%.
- 74–78,5 см. Торф черного цвета с волокнистыми остатками растений, в составе которых преобладают зеленые мхи.
- 78,5–108 см. Торф светло-коричневого цвета, сложенный остатками корневищ и влагалищ листьев вахты с примесью остатков травянистых растений и листьев карликовой березки. Степень разложения 30%. В отличие от предыдущих слоев, где лед заполняет промежутки между остатками растений, в этом пласте лед имеет форму линзочек толщиной 2,3–10 мм и диаметром до 20 мм, разделенных прослойками торфа толщиной 1–2 мм.
- 108–159 см. Линза чистого льда с вмержшими стволами и сучьями деревьев, концы которых выходят за пределы линзы.



- 159–195 см. Слой ячеистой структуры, где небольшие (3–4 мм толщиной) линзы льда разграничены тонкими (1–2 мм) прослойками торфа. В составе торфа преобладают травянистые остатки (пушица, в меньшей степени вахта), в малом количестве присутствуют остатки листьев карликовой березки. Степень разложения 30%.
- 195–201 см. Придонный слой, в котором наблюдаются макроскопические обильные остатки древесины. Кроме того, при ботаническом анализе в нем выделены остатки пушицы, хвоща и вейника.
- 201 см и глубже. Сизая оглеенная глина, густо пронизанная прожилками льда.

Г.А. Боровиков исследовал растительность Катанга-Ангарского междуречья в 1909 и 1910 гг. Обследованные им торфяные болота в лучшем случае имели крупнокочковатый рельеф. Боровиков отмечал малую мощность (1,0–1,5 м) торфяной залежи заангарских болот и их преимущественное развитие в долинах рек. Только в одном случае в долине реки Зааря в непосредственной близости от Подкаменной Тунгуски он отметил небольшой торфяной бугор высотой около 1,5 м. Остальные описанные Боровиковым крупнобугристые массивы находятся уже в правобережье реки Катанга.



Рис. 8. Крупнобугристый торфяник в районе падения Тунгусского метеорита (фото Е.М. Колесникова)

В то же время многолетнемерзлые грунты на Катанга-Ангарском междуречье широко распространены. Зондировка шупом и прикопки, произведенные Г.А. Боровиковым и Д.А. Драницыным [11], показали мощность

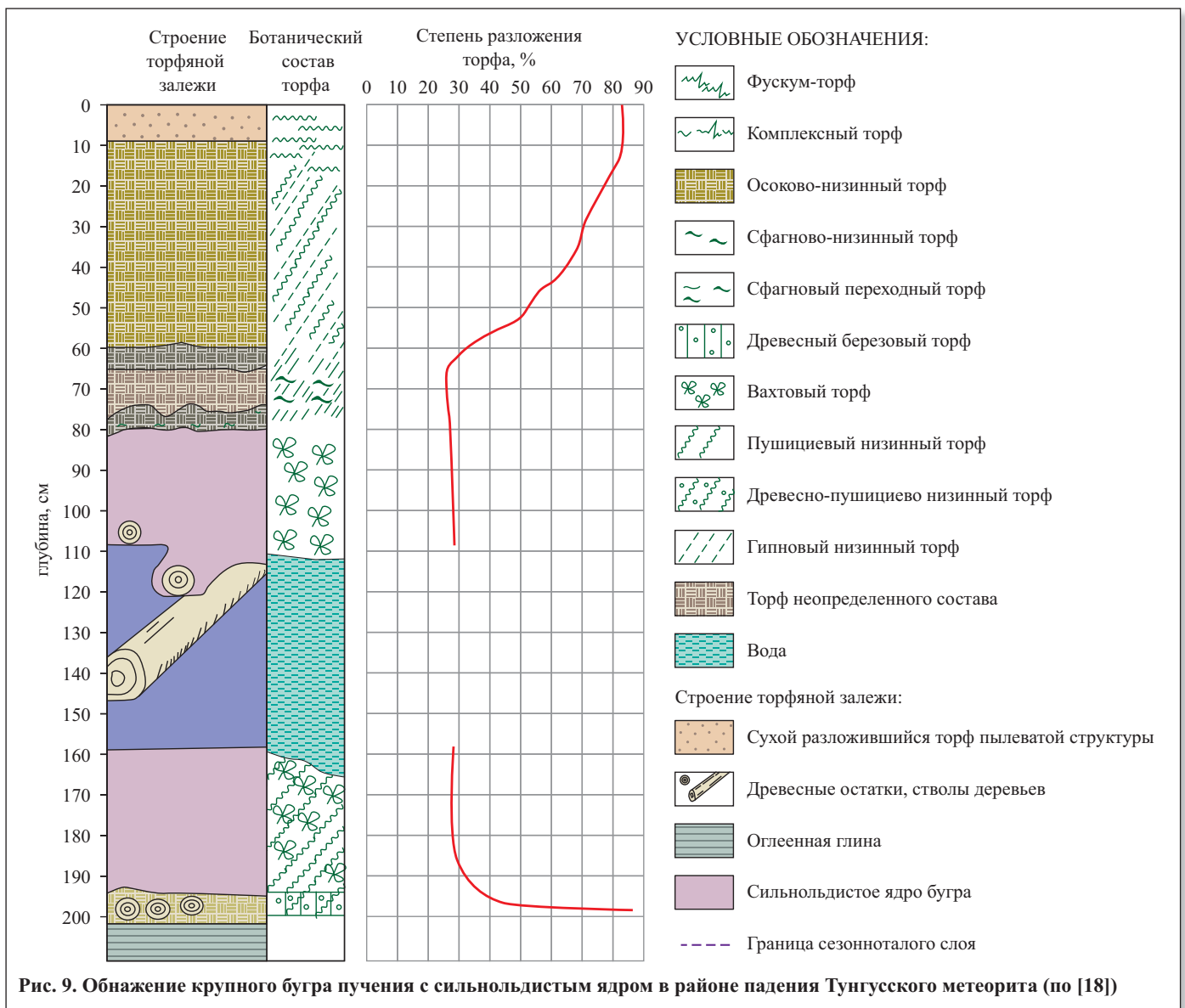


Рис. 9. Обнажение крупного бугра пучения с сильнольдистым ядром в районе падения Тунгусского метеорита (по [18])

деятельного слоя в конце лета более 2–3 м на песчаных грунтах и 20–25 см под слоем мха в густых ельниках.

Летом 1960 г. Ю.А. Львовым с соавторами [18] были обследованы следующие крупнобугристые торфяные массивы: четыре торфяника, лежащие вдоль тропы Кулика по линии Ванавара — заимка Кулика; болота Куликовской котловины, расположенной в центре района падения метеорита; Западное болото, лежащее в 45 км к юго-западу от этой котловины. Крупнобугристые торфяники здесь представляют собой комплекс крупных (до 6–7 м высотой) многолетнемерзлых торфяных бугров с талыми, обильно увлажненными межбугровыми понижениями (мочажинами). В основе такого бугра располагается мерзлое минеральное ядро, сложенное в одних массивах супесями, в других — суглинками или глинами. Цвет от сизого до сизо-синего свидетельствует о значительном оглеении подстилающих торфяник грунтов; их буроватые тона наблюдались только по периферии массивов на молодых мелкозалежных участках. Минеральное ядро бугра, как шапкой, покрыто слоем торфа различной мощности; его максимальная мощность (более 3 м) была обнаружена на Северном болоте [18].

Ю.А. Львов с соавторами [18] указывают, что в обследованном районе имеются бугристые торфяники, находящиеся на разных стадиях развития. Наиболее молодые из них обнаружены в долине реки Макикта (около 61° с.ш.). Они еще не имеют ярко выраженного бугристого рельефа и разделены на крупные участки только ложбинами стока. Растительный покров их представлен кустарничково-сфагновой группировкой с основой из мха *Sphagnum fuscum Klinggr.* Торфяник подобного типа имеется и в Метеоритной котловине к западу от истоков ручья Чургим. Торфяник Каровый, расположенный в одном из ответвлений долины реки Макикта, находится на более поздней стадии развития. В его бугристой части имеется несколько крупных мочажин, еще не расчленивающих его на отдельные участки. Сам бугор плоский и широкий, высота его не превышает полутора метров. В строении растительного покрова положительных элементов рельефа этого массива наряду со сфагновыми мхами значительная роль принадлежит лишайникам. Наиболее поздние этапы развития рельефа крупнобугристых торфяников наблюдаются в северо-восточной части котловины. Здесь в результате термокарста положительные элементы рельефа представлены большим количеством небольших по площади изолированных бугров, многие из которых полностью или в значительной степени разрушены, остальные же подвержены интенсивной денудации [18].

Торфяная залежь бугров двухслойная. Верхний слой образован на неразрушенных частях бугров фускум-торфом, нижний же — разнообразными низинными торфами. Граница между этими двумя слоями обычно резкая, говорящая о быстрой смене растительности при смене условий водно-минерального питания в результате мерзлотного пучения. Ледяные включения имеются как в слое торфа, так и в грунте. В грунте лед наблюдается в виде тонких разветвленных прожилок, в торфе — или в виде ледяных линз правильной формы (причем в разных группах торфов размеры и отчасти форма линз различны), или в виде

заполненных пустот (в моховой группе торфов). Мощность ледяных линз — до 1 см. Крупная ледяная (ледо-грунтовая) линза в торфе была обнаружена Ю.А. Львовым и др. [18] только один раз, ее мощность составляла 65–67 см, залегала она в основании торфяной залежи (см. рис. 9).

Эпицентр взрыва от падения Тунгусского метеорита (60°54'07" с.ш., 101°54'16" в.д.) случайно практически совпал с центром разрушенного древнего вулкана (Куликовского палеовулкана), описанного в 1975 г. Н.Л. Сапроновым и В.М. Соболенко. Этот район представляет собой невысокое лесистое плато, находящееся в области sporadического распространения многолетнемерзлых грунтов. Нижняя ее граница на торфяниках залегает на глубине 25 м. В сухих бугристых торфяниках мерзлота оттаивает к концу лета лишь до 35–45 см от поверхности, в то время как в каменистых грунтах она отсутствует на глубине 1 м и даже более. Следствием распространения многолетнемерзлых грунтов в районе является мощное развитие процессов вспучивания бугров на торфяных болотах (с. 66 [5]).

В.А. Рукавишников сообщил, что по данным бурения на бугристом торфянике в северной части платформы напротив Метеоритной заимки многолетнемерзлые породы в августе залегают на глубине 0,5 м и кончаются на глубине 25 м [2]. Дальше идут водоносные супеси и пески. Наибольшая глубина буровой скважины была 31,5 м. При вскрытии буром водоносного горизонта вода в обсадной трубе резко поднялась на два десятка метров, что говорит о том, что она находилась под давлением.

На ровном участке размером 40×50 км, приподнятом примерно на 70 м над долинами соседних притоков Подкаменной Тунгуски — речек Кимчу и Хушмо, также встречены бугристые торфяники. Из них особо отмечаются два в виде островов в северной части болота [15]. Здесь наблюдается преобладание бугров над низинами и спокойное параллельное напластование слоев минеральных грунтов и торфа в пальза. Минеральное ядро бугров слегка выпуклое, граница его с торфом резкая.

Сусловская воронка (60°54' с.ш., 101°54' в.д.) имеет диаметр примерно 32 м, ее борта заросли кустарником, в отдельных секторах выросли деревья — березы, сосны, кедры. Особенно активный рост деревьев наблюдается на откосах траншеи, прорытой Л.А. Куликом в 1928 году в борту воронки для спуска воды из нее (на рис. 10 представлен разрез крупного бугра с сильнольдистым ядром на борту траншеи). Дно воронки к настоящему времени заросло болотной растительностью.

После спуска воды экспедицией Л.А. Кулика верхний моховой слой осел на дно воронки и она приобрела вид чаши. На ее дне были пробурены три скважины. Одна из них была на северном борту. Она прошла 25 м многолетнемерзлых грунтов и около 6 м водоносного горизонта. Вторая скважина была пробурена в центре воронки в мерзлом грунте до глубины 20 м, а затем работа была приостановлена из-за обводнения. Третью скважину пытались бурить на южном борту воронки.

В 1998 г. с помощью георадара «Лоза» была изучена внутренняя структура Сусловской воронки до глубины 20 м.



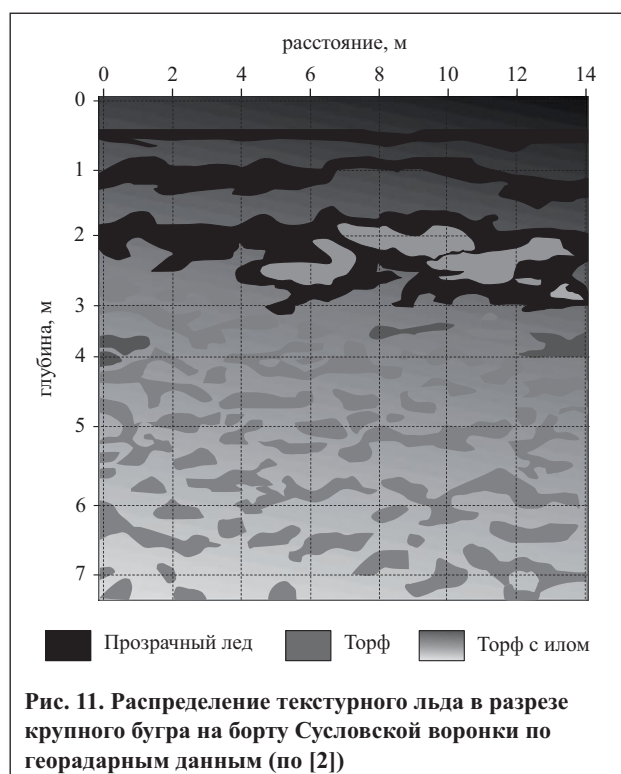
В 2009 г. в лесу в южной части Северного болота на площади диаметром 100 м по геоботаническим контурам болотной растительности были выявлены четыре воронки. С помощью георадара была изучена их конусная структура. К югу от Сусловской воронки на расстоянии примерно 60 м были найдены еще две структуры — сдвоенная и строенная воронки. Они также были изучены с применением георадара. На расстоянии примерно 60 м от северной границы Южного болота были найдены три соединенные воронки, расположенные полукругом. Еще одна воронка была обнаружена на северной границе этого болота. В 2010 г. была проведена георадарная съемка вдоль траншеи Л.А. Кулика и далее вдоль западного борта Сусловской воронки [1, 2] (рис. 11).

Ю.А. Львовым с соавторами [18] изучено еще несколько массивов крупнобугристых торфяников в смежных районах. Цветковский торфяник расположен в 7 км (по тропе Л.А. Кулика) от поселка Ванавара. Он залегает в неглубокой депрессии рельефа и представляет собой торфяник центрального типа — с одним обширным бугром, измятым и частично расчлененным термокарстом. Этот участок подробно описан в работе Л.В. Шумиловой [38], обследовавшей его в 1929 г. За последующие 30 лет произошло, видимо, некоторое изменение растительного покрова, выразившееся в увеличении площади лишайниковой формации за счет сокращения площади моховой дернины, а также увеличения площади мертвопокровных участков.

На участке чистой фускум-дернины на восточном склоне бугра недалеко от его подножия (ввиду сильного разложения верхних горизонтов торфа на вершине пальза) был заложен шурф. Здесь была обнаружена сравнительно маломощная (87 см) залежь торфа, подстилаемая темно-бурой глиной со следами оглеения. Залежь построена следующим образом: с поверхности до глубины 50 см идет чистый фускум-торф с постепенно повышающейся до 15% степенью разложения. В слое на глубине 50–55 см пятна слабо разложившегося фускум-торфа внедрены в торф высокой (30%) степени разложения, состоящий из остатков травянистых растений. Ниже идут низинные торфа, в составе которых встречаются листья низинных сфагновых мхов, почти исчезающие с глубиной, обильны кора и листья березы, остатки низинных пушиц, вахты и пр. Степень разложения этого слоя

30–35%. В придонном слое, располагающемся на глубине 80–87 см от поверхности, торф на три четверти образован корой березы и макроскопическими остатками ее древесины. Видимо, этот участок сравнительно недавно — не более 100–150 лет назад — был занят олиготрофной растительностью в результате мерзлотного поднятия окрестных болот, примыкающих к буграм [18].

Торфяник Чамбинский расположен на правобережной надпойменной террасе реки Чамба и представляет собой сложный комплекс лесных и гипново-осоковых мелкозалежных низинных болот различных типов, среди которых островом возвышается крупнобугристый участок, частично отчлененный от основной площади террасного болота невысокой грядой суходола. 11 июля мерзлые породы на ровных участках, покрытых дерниной мха *Sphagnum fuscum*, находились на глубине от 35,5 до 40,5 см, под пологом кустарников они залегали на 4–5 см выше, а на местах, лишенных растительности, опускались до 42–45 см. Мочажины



были тальми до самого дна. Шурф был заложен на вершине бугра пучения: сверху залегал торф, а на глубине 160 см обнаружился оглеенный песок [18].

Торфяник Каровый залегает в карообразной котловине на склоне долины реки Макикта. Здесь бугры низкие (высотой 1,0–1,5 м), плосковершинные, с крупнокочковатым микрорельефом, густо заросшие кустарничками и кустарниками, среди которых по периферии пальза преобладает береза приземистая (*Betula humilis Schrank*), образующая обширные куртины преимущественно там, где нарушен моховой покров. В центральной части бугров обилён багульник, здесь же сохранился и мох *Sphagnum fuscum*.

Метеоритная котловина занята бугристым массивом периферийного типа, причем в наиболее пониженной ее части развито обширное талое низинное Южное болото, а бугристые торфяники, составляющие с ним единую систему, располагаются по пологим склонам котловины в виде трех крупных языков, средний из которых получил название Центрального торфяника. Степень термокарстовой расчлененности бугристых участков увеличивается при приближении к Южному болоту, так что в его пределы внедрены отдельно стоящие бугры, например Северные острова.

Языки болота отличаются друг от друга возрастом и степенью деградации мерзлоты и торфяной залежи, а в связи с этим и сложностью рельефа, строением и составом растительного покрова и т.д. Бугры восточного языка, расположенного к востоку от горы Стойковича, подвержены наиболее интенсивному разрушению. Большие по площади участки пальза здесь просели настолько, что выше уровня воды находятся только отдельные их останцы высотой 3–4 см. Торф на них рассечен трещинами, на обнаженных участках он рассыпается в пыль, в отдельных случаях на крутых склонах он оползает целыми глыбами или осыпается под ногами.

Более крупные бугры поросли высокоствольным (до 12–15 м высотой) лиственнично-березовым лесом или покрыты зарослями карликовой березки. Часть деревьев, росших по урезу воды, в настоящее время опрокинута в мочажины вместе с оползшими глыбами торфа. На других болотах авторам работы [18] не встречался так далеко зашедший процесс разрушения бугров.

Центральный торфяник в 1929 г., по сообщению Л.В. Шумиловой [38], имел несколько иной растительный покров, чем в начале 1960-х гг. Мох *Sphagnum fuscum* являлся фоновым растением, занимая положительные элементы рельефа (в частности, вся плоская вершина бугра от Суловской воронки до Кобаевого острова была занята фускум-формацией). В 1960 г. фоновым растением стал лишайник, участки чистой дернины сфагновых мхов без примеси лишайников сохранились только за Кобаевым островом и у подножий гор Эйхвальда и Лысая. На большей части Северного болота мох *Sphagnum fuscum* отступил на вершины кочек, но и там его дернина смешана с лишайниками [18].

Деревья (лиственница, береза пушистая) встречаются только по окрайкам бугристого комплекса, или же береза приурочена к склонам мочажин. Пышная молодая поросль березы развилась по бортам траншеи у

Суловской воронки. Лиственница, пережившая падение Тунгусского метеорита, имеет хорошо сформированную новую крону. Некоторое изменение состава растительного покрова в сторону большего участия лишайников произошло с 1930 по 1960 г. Причина этого явления не связана с метеоритом [18].

Совершенно иное строение имеет растительный покров изолированно расположенных в пределах Южного болота Северных островов, представляющих собой два измятых термокарстом бугра, разделенных провальной мочажинной. Моховой и даже лишайниковый ярусы здесь полностью отсутствуют, только изредка можно обнаружить небольшие кочки мха *Polytrichum alpestre*. На поверхности этих бугров наблюдаются многочисленные стволы и выворотни лиственниц, позволяющие предположить, что до катастрофы бугры были покрыты лиственничным лесом с диаметром стволов деревьев 20–25 см. Исходя из описаний Л.В. Шумиловой [38] и наблюдений Ю.А. Львова и др. [18] на бугристых болотах, расположенных вне района повала леса, подобного размера деревья развиваются в тех частях бугров, где отсутствует моховая дернина и не происходит увеличения слоя торфа. Видимо, и до 1908 г. моховая растительность на изолированных буграх Южного болота не была развита, а травяно-кустарничковый ярус по составу был близок к современному.

Обращает на себя внимание пестрота строения нижних горизонтов залежи, сложенных низинными торфами, которая свидетельствует о комплексности, сложности строения низинных болот, давших начало центральному торфянику, и о различных путях сукцессионной смены растительности разных участков болота.

Южное болото залегает в наиболее пониженной части котловины и представляет собой низинное осокково-гипновое болото с грядово-мочажинным типом поверхности. Максимальная глубина (7 м) — в его центре. Сброс избыточных вод осуществляется ручьем Чургим. По очень пологим берегам низинного болота, как уже отмечалось выше, расположены крупнобугристые комплексы. Там, где наклон бортов ложа превышает 30–35°, низинные группировки вплотную подходят к берегу, а в местах меньшего наклона берегов развиваются своеобразные мерзлые бугры, имеющие вид валов высотой 2,5–3,0 м, шириной 15–20 м и длиной 50–100 м. Эти валы вытянуты параллельно береговой линии. Обычно вдоль нее тянется один, реже два рядом расположенных вала. В западной же части болота у истоков Чургима валы скапливаются по нескольку, будучи отделенными друг от друга узкими (15–30 м) и длинными очень топкими мочажинами. Истоки ручья прокладывают себе путь (ложбину) поперек каждого очередного вала и теряются, проходя через мочажину.

Рельеф валов неровный, отдельные точки их поверхности превышают уровень воды в мочажине на 4,5–5,0 м. Торфяной слой весьма разрушен, так что иногда при прикопке на глубине 30–50 см обнаруживается минеральный грунт, однако в других случаях обнажения показывают мощность торфяного пласта 1,5–2,0 м [18].

В 1939 г. Л.А. Кулик [15], производя зондировку участка дна Южного болота, обнаружил, что в неко-



торых придонных образцах небольшие по мощности слои торфа чередуются с тонкими прослойками грунта — «зеленого ила».

В северо-таежной зоне долины реки Котуй лесообразующей является лиственница. Кроме того, встречаются ель, береза и тополь. В подлеске наиболее распространены ива, ерник, ольха. Напочвенный покров — мохово-лишайниковый. По долинам развиты ерничково-моховые редколесья. Крупнобугристые болота — с кустарниково-моховыми буграми и пушицево-моховыми мочажинами.

2.3. Южные участки распространения миграционных бугров пучения в Нижнем Приангарье

Многолетнемерзлые породы с буграми пучения отмечены близ быстро развивающегося города Козинска ($58^{\circ}41'00''$ с.ш., $99^{\circ}11'00''$ в.д.), расположенного в 12 км от створа гидроузла Богучанской ГЭС на реке Ангаре. Они встречаются в долинах ручьев и оврагов, на заболоченных участках, на затененных и залесенных склонах северной экспозиции. Мощность ММП изменяется от 0,5 до 10–15 м. Их температура колеблется от $0,1^{\circ}\text{C}$ до минус $0,5^{\circ}\text{C}$. Встреченные здесь бугры пучения приурочены к заболоченным участкам, долинам ручьев и падям, т.е. к участкам с большой мощностью суглинистых рыхлых грунтов.

Л.В. Карпенко [12] исследовала многолетнемерзлый бугристый торфяник в акватории будущего водохранилища Богучанской ГЭС в долине реки Кова ($58^{\circ}12'$ с.ш., $100^{\circ}10'$ в.д.) и обнаружила, что по краям переходных болот на первой надпойменной террасе встречаются бугры пучения с сильнольдистым и даже ледяным ядром. Мощность торфа здесь варьирует от 0,25 до 1,50 м. Под бугорково-мочажинными комплексами встречаются линзы льда, которые залегают на глубине 0,3–0,4 м, по краям болот нередки бугры пучения, сложенные чистым льдом (с. 113 [12]).

На значительной части территории вблизи поселка Таежный ($58^{\circ}04'$ с.ш., $97^{\circ}18'$ в.д.) Богучанского района отмечены условия, благоприятные для морозного пучения. Пальза встречены на левобережных пологих склонах долин рек Карабула ($58^{\circ}36'$ с.ш., $97^{\circ}02'$ в.д.) и Кунчет ($58^{\circ}36'$ с.ш.), а также на склонах северо-западной и северо-восточной экспозиции в устье реки Кунчет. Среднегодовая температура воздуха здесь составляет минус $2,5^{\circ}\text{C}$. Продолжительность периода с отрицательными средними месячными температурами составляет 150–170 дней. Самый холодный месяц — январь, средняя многолетняя температура января — минус $24,4^{\circ}\text{C}$, июля — плюс $17,2^{\circ}\text{C}$. Среднегодовая сумма осадков равна 400–450 мм, высота снежного покрова зимой достигает 100 мм. Основной тип растительности — сосновые сообщества. Постоянными спутниками сосновых сообществ являются кустарники и кустарнички: кустарная ольха, кедровый стланик, различные березки, багульник, голубика, толокнянка, брусника и некоторые другие. При этом во многих случаях напочвенный ярус из мхов или лишайников бывает выражен слабо и не определяет характеристики сообществ.

Бугристые формы описаны даже на острове Ольхон ($53,15^{\circ}$ с. ш. $107,38^{\circ}$ в.д.) на озере Байкал (рис. 12).

2.4. Южные места распространения миграционных бугров пучения в Алдан-Тимптонском междуречье

Выпуклобугристые торфяники на юге Якутии встречаются на старичных участках террас по периферии термокарстовых озер. В большинстве случаев они занимают небольшую площадь и представляют собой массивы из отдельных или нескольких куполообразных торфяных бугров высотой 3–5 м и диаметром 5–20 м [37].

В Южной Якутии трасса ТС ВСТО-1 пересекает участки с многолетними буграми пучения. Например, бугристый массив в долине реки Хатынг-Уэся (приблизительно 58° с.ш.) в 200 км западнее города Олекминска пересечен ВСТО-1 и существенно деградировал к настоящему времени (рис. 13). Заметно изменены бугры в пределах долин рек Халдя, Никак, Васильевка, Аччыгый-Леглегер, Горбыллах, ручья Озерный (рис. 14–17). В межбугристых понижениях в долине реки Халдя (40 км южнее стационара Керак) вдоль трассы ВСТО-1 скапливается мощный снежный покров, оказывающий отепляющее воздействие на грунты, и в летнее время эти участки обводнены, здесь развивается термокарст. В долине реки Керак организован стационар по наблюдению за динамикой миграционных торфяных бугров пучения ($57^{\circ}58'$ с.ш., $125^{\circ}30'$ в.д.). Здесь их высота обычно около 2 м, но наиболее крупные бугры достигают высоты 5 м. Вершины бугров и понижения покрывают кедровый стланик, багульник, березка Миддендорфа, брусника. Мощность торфа на бугре превышает 1 м. По радиоуглеродным данным (см. таблицу), возраст торфа близ подошвы составляет 4205 ± 55 лет [35].

Е.Н. Оспенников и др. [24, 25] и Ю.В. Станиловская [30] исследовали торфяной массив Горбыллах ($56^{\circ}25'$ с.ш., $124^{\circ}53'$ в.д.) с многолетними буграми пучения, расположенный южнее города Нерюнгри в Верхнегорбыллахской тектонической депрессии (рис. 18–20) в верхней части долины одноименной реки на абсолютной высоте 800 м. По периферии одного из озер расположено шесть бугров пучения высотой от 2 до 6 м. Самый высокий 6-метровый бугор имеет овальную форму (вытянут с востока на запад) и является куполообразным, с плоской слабовыпуклой вершиной, по которой



Рис. 12. Мерзлые торфяные бугры пучения на острове Ольхон на Байкале (фото А. Рыбченко)



Рис. 13. Буристый массив в долине реки Хатынг-Уэя в 200 км западнее города Олекминска вдоль трассы ТС ВСТО-1 (фото Ю.В. Станиловской, май 2011 г.)



Рис. 14. Быстрое протаивание многолетнемерзлых грунтов и миграционных бугров пучения в долине ручья Озерный в 10 км южнее стационара Керак (Южная Якутия) вдоль трассы нефтепровода ВСТО-1: а — август 2010 г. (фото Ю.В. Станиловской), б — август 2011 г. (фото М. Разумец)

проходит продольная трещина длиной 14 м, шириной 5 см и глубиной 10 см. В морфологии бугра достаточно четко выражен приподнятый на 0,5–1,0 м вытянутый пьедестал (повторяющий форму основания бугра), ограниченный невысокой выраженной ступенькой, которая, однако, не выдерживается по всему периметру.



Рис. 15. Многолетние миграционные торфяные бугры пучения в долине реки Аччыгый-Леглегер в 20 км южнее стационара Керак. На ближнем плане — трасса ВСТО-1, притрассовая дорога и срезанный торфяной бугор пучения (фото М. Разумец, август 2011 г.)

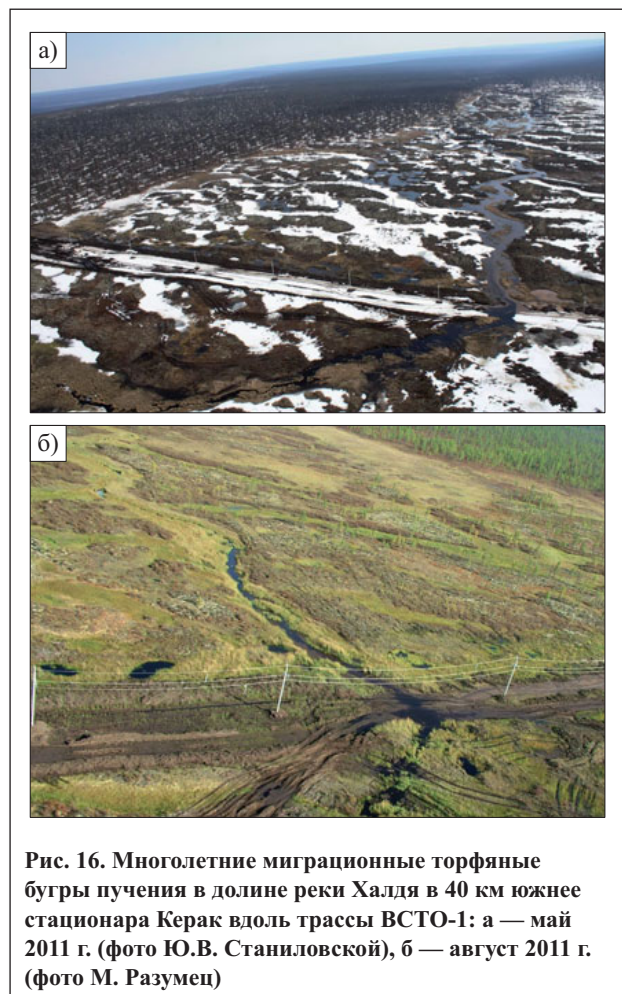


Рис. 16. Многолетние миграционные торфяные бугры пучения в долине реки Халдя в 40 км южнее стационара Керак вдоль трассы ВСТО-1: а — май 2011 г. (фото Ю.В. Станиловской), б — август 2011 г. (фото М. Разумец)

Растительный покров данного бугра представлен угнетенными лиственничными лесами с подлеском из березы Миддендорфа и кедрового стланника. Распределение растительности неоднородно: на склоне южной экспозиции произрастают карликовая березка Миддендорфа высотой до 0,7 м и голубика, склон северной экспозиции покрыт моховым покровом с отдельными кустарничками (багульник). В сплошном моховом покрове между описываемым пальза и сосед-



Рис. 17. Многолетние миграционные торфяные бугры пучения на участке Керак (Южная Якутия, август 2008 г., фото Ю.В. Станиловской)

ними буграми господствуют мхи *Polytrichum strictum* и *Sphagnum riparium* [30].

Практически весь торфяной покров бугра сложен сфагновым низинным торфом. В составе торфа преобладают остатки растений, предпочитающих избыточное увлажнение, — сфагновых мхов (*Sphagnum riparium*, *Sphagnum lenens*), примерно 10% пушицы (*Eriophorum*). Встречены единичные остатки осоки топьяной (*Carex limosa*), зеленых мхов (*Drepanocladus*), коры березы (*Betula*) и древесины хвойных деревьев. В состав торфа, залегающего с поверхности на вершине бугра, входит 95% остатков зеленых мхов (*Polytrichum strictum*), а также 5% сфагновых мхов (*Sphagnum riparium*).

Состав растительных остатков свидетельствует о том, что бугор сформировался очень быстро, до того как начал накапливаться настоящий верховой торф. До глубины 0,8 м залегает сфагновый низинный торф с уменьшающейся от 25 до 15% (с глубиной) степенью разложения и разной зольностью (от 5,60 до 12,72%). В составе этого торфа преобладают сфагновые мхи

Таблица

Радиоуглеродные даты торфяных бугров пучения в южных районах криолитозоны Средней Сибири (Южная Якутия)				
Место взятия образца	Глубина, м	Радиоуглеродная дата, лет	Лабораторный номер образца	
Бугор пучения высотой 4–6 м в торфяном массиве Суоллах в Алдано-Тимптонском междуречье (по [24])	0,20	3420 ± 50	ГИН-4355	
	2,30	8950 ± 70	ГИН-4356	
	2,50	10750 ± 80	ГИН-4357	
	2,70	9940 ± 60	ГИН-4358	
	2,90	9990 ± 90	ГИН-4359	
	3,30	9910 ± 80	ГИН-4360	
	3,50	10120 ± 120	ГИН-4361	
	3,90	10610 ± 70	ГИН-4362	
Бугор пучения в долине реки Горбыллах (определение возраста выполнено по образцам, отобранным Ю.В. Станиловской в 2006 г.)	вершина	0,18	2870 ± 210	ГИН-13947
	подножие	0,45	2170 ± 240	ГИН-13949
		0,65	2570 ± 110	ГИН-13950
Бугор пучения в долине реки Керак	1,00	4205 ± 55 лет	-	



Рис. 18. Миграционные бугры пучения на правом берегу озера в долине реки Горбыллах и срезанные бугры вдоль трассы ВСТО-1. Справа вдали виден полигональный рельеф (фото Ю.В. Станиловской, август 2010 г.)



Рис. 19. Многолетний миграционный торфяной бугор пучения в обрамлении озера в долине реки Горбыллах (Южная Якутия): а — зима 2007 г.; б — август 2006 г. (фото Ю.В. Станиловской)

Sphagnum riparium, *Sphagnum lenense*, *Sphagnum sect. Acutifolia*; встречаются также зеленые мхи *Drepanocladus*, *Calliergon stramineum*, *Aulacomnium* и осока *Carex limosa*. Обнаружены также остатки коры березы (*Betula*) и древесины хвойных деревьев.

На склоне торфяного бугра с поверхности залегает слой переходного торфа с увеличивающейся (вниз по разрезу) от 15 до 20% степенью разложения и зольностью, изменяющейся от 10,32 до 26,53%. В составе переходного торфа преобладают сфагновые мхи (*Sphagnum compactum* — 70%, *Sphagnum fuscum* — 45%, *Sphagnum riparium* — 45%). Также встречены единичные включения зеленых мхов (*Drepanocladus*), осоки топяной (*Carex limosa*) и древесины хвойных деревьев. Под переходным торфом залегает сфагновый низинный торф со степенью разложения 27% и зольностью 7,47%. В его составе преобладают сфагновые мхи (*Sphagnum riparium* — 80%) и встречены единичные остатки зеленых мхов (*Drepanocladus*), коры березы (*Betula*) и древесины хвойных деревьев.

У подножия бугра залегают низинные торфа с увеличивающейся (с глубиной) от 10 до 25% степенью разложения и растущей от 4,9 до 9,4% зольностью. В их составе преобладают сфагновые мхи (*Sphagnum ripa-*

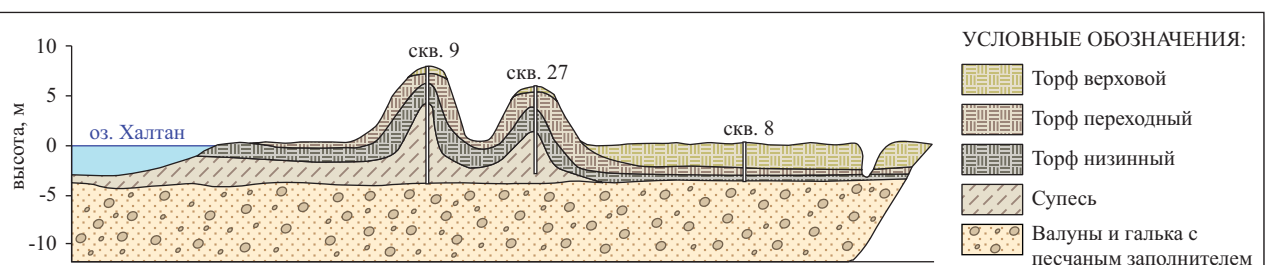


Рис. 20. Схематический разрез болотного массива в верховьях реки Горбыллах в Южной Якутии (по [25])



rium — 80—90%, *Sphagnum lenense* — 20%), встречаются единичные включения зеленых мхов (*Polytrichum*, *Drepanocladus*) и пушицы (*Eriophorum*) [30].

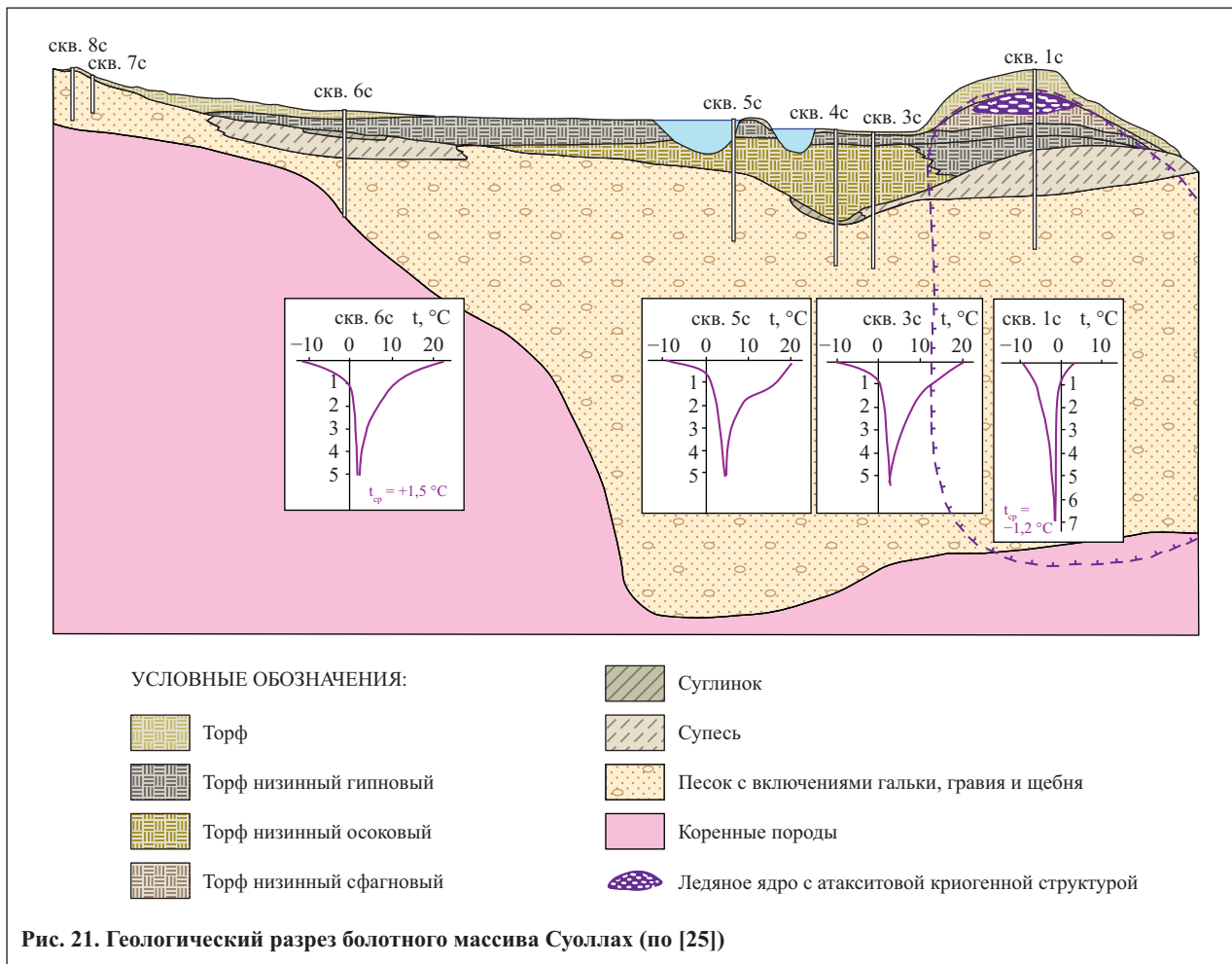
Вокруг описываемого бугра пучения сильно обводненные понижения заполнены переходным торфом с зольностью 5,08%. В составе переходного торфа преобладают сфагновые (*Sphagnum balticum*, *Sphagnum magellanicum* — 55%) и зеленые (*Polytrichum* — 45%) мхи. Согласно данным радиоуглеродного анализа бугор пучения на участке Горбыллах сформировался не ранее чем 2870 лет назад (см. таблицу). Интересно, что палза высотой до 8 м, сформировавшиеся почти на той же широте (57°45 с.ш., 76° з.д.) в долине реки Бонифейс в Канаде начали формироваться не ранее чем 1800 лет назад [40].

Крупные многолетние бугры пучения исследованы на заболоченных участках дна долины реки Горбыллах. Здесь в районе озера Халтан площадь болотного массива составляет около 5 км². По мере удаления от озера низинные болота сменяются на мезотрофные и верховые. Мезотрофные болота этого вида простираются в виде каймы шириной до 100 м. Бугры пучения приурочены к приграничной зоне переходных и верховых болот. Высота бугров достигает 8 м, а диаметр у основания — 20–30 м. Они сложены преимущественно низинным и переходным торфом мощностью около 3 м, подстилаемым супесью. В основании разреза залегает валунно-галечниковый горизонт с песчаным заполнителем. Как полагают Е.Н. Оспенников с соавторами [25], многолетнее промерзание тор-

фяника и подстилающих его аллювиальных отложений с образованием бугров пучения происходило на этапе перехода его питания от грунтового к атмосферному. Этот этап четко фиксируется резким уменьшением степени разложения торфа до 5–15% по сравнению с 60–75% в нижней части разреза. По-видимому, эти процессы происходили сравнительно недавно, о чем свидетельствует практически полное отсутствие на поверхности бугров торфа верхового типа.

Разрез бугра пучения в днище долины реки Горбыллах представлен торфом мощностью 2,5 м, мерзлым с глубины 0,8 м, подстилаемым переслаивающимися горизонтами супеси, суглинка и песка. Верхний горизонт торфа имеет массивную и микролинзовидно-слоистую криотекстуру; льдистость этого горизонта не превышает 20–30%. Ниже по разрезу криотекстура меняется на атакситовую, линзовидно-сетчатую и крупношпировую, нередко косослоистую, что отражает специфические условия промерзания отложений в краевых частях болотных массивов; льдистость здесь возрастает до 70–95%. Такое распределение льдистости торфа отмечено и по другим скважинам, пробуренным в болотах такого типа (более 300 определений).

Е.Н. Оспенниковым в Южной Якутии изучены три болотных массива с буграми пучения [23, 24]. Два из них (Дерпут и Суоллах) образовались при заторфовывании озер и расположены на Чульманском плато, а третий (Алексеевские болота), возникший при заболачивании минеральных почв, находится на Алданском плоскогорье.



Болотный массив Дерпут приурочен к неотектоническому блоковому понижению в верхней части долины одноименной реки (абс. отм. около 700 м), сложенному сверху озерно-болотными отложениями мощностью 20–25 м. Многолетнемерзлые грунты имеют здесь прерывистое и островное распространение со среднегодовыми температурами от 0 до минус 2°C. В болотном массиве, на поверхности которого существует верховое лиственнично-кустарничково-сфагновое болото, среднегодовая температура грунтов составляет минус 1,4 — минус 2,0°C. Под термокарстовыми озерами развиты талики со среднегодовой температурой до плюс 2,5°C [23].

Болотный массив Суоллах находится примерно в 15 км от массива Дерпут и располагается в приводораздельной седловинной части долины одноименного ручья (абс. отм. около 750 м). Водораздельная седловина выполнена 20–25-метровой толщиной песка (с включениями мелкой гальки, гравия и щебня), супесью и суглинком (рис. 21). Сверху залегает торфяной горизонт мощностью до 4,5 м. На бугристой поверхности массива развито кустарничково-сфагновое болото. Среднегодовая температура грунтов по данным режимных геотермических наблюдений составляет здесь минус 1,8 — минус 2°C [23].

Суммарная льдистость торфа варьирует по разрезу от 50% в горизонтах с мелкими включениями льда до

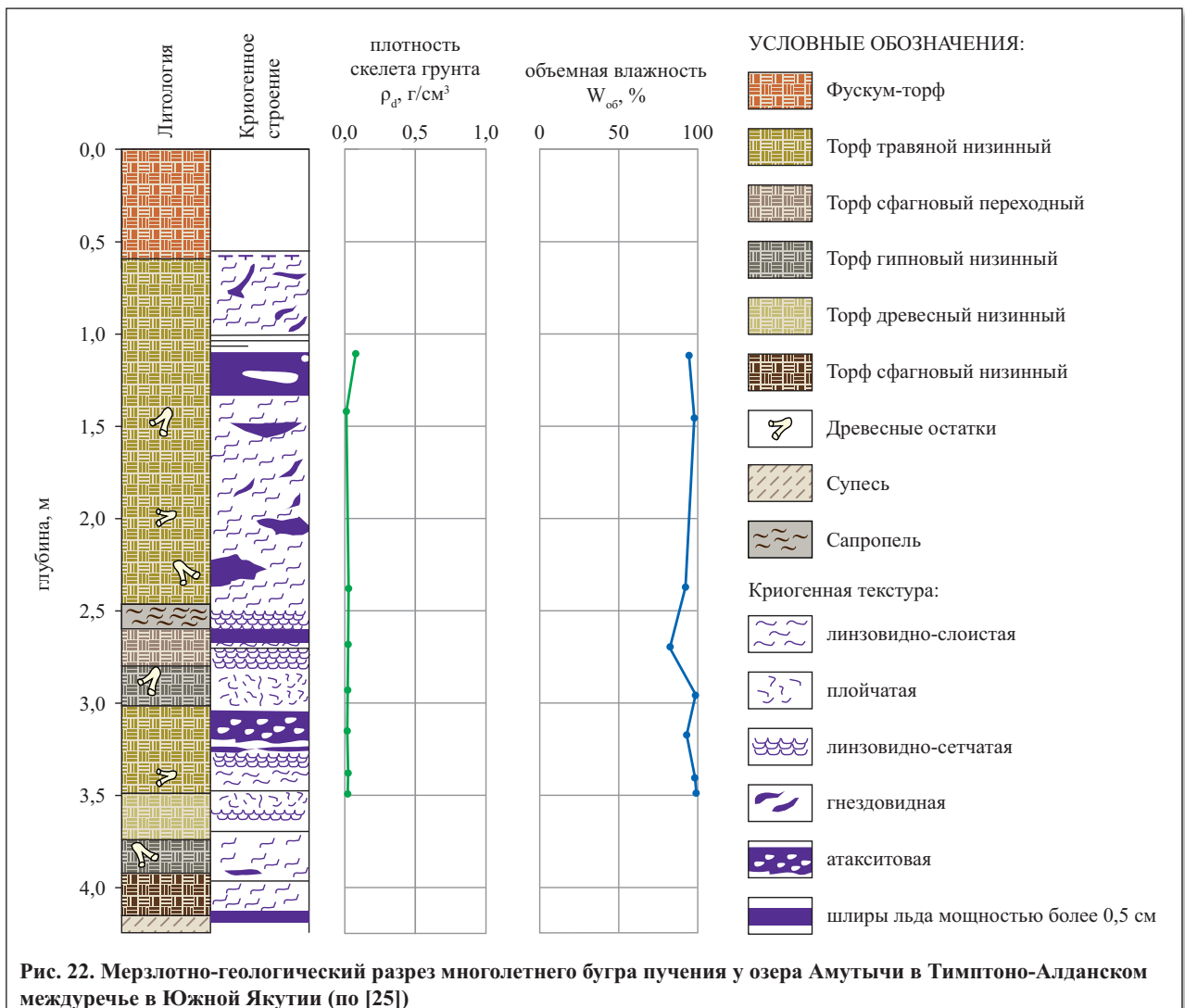
80–90% в горизонтах с атакситовой криотекстурой и крупными шлирами льда. В целом льдистость торфа довольно высокая по всему разрезу, что указывает на то, что осадки промерзали в слаболитифицированном водонасыщенном состоянии.

Криогенное строение низинного и переходного торфа в нижней части торфяной толщи характеризуется преобладанием шлировых и линзовидно-сетчатых и атакситовых криотекстур, объемная льдистость достигает 90%.

Для верхового торфа, в виде тонкого слоя залегающего на поверхности бугров, характерно практически полное отсутствие шлировых и сетчатых криотекстур. Преобладают микролинзовидно-слоистые текстуры с отдельными линзами льда мощностью до 1 см. Льдистость верхового торфа сокращается до 60–80%.

Незначительная мощность горизонта сапропеля, который часто накапливается в отложениях торфяников, образующихся на месте водоемов, а также их большая запыленность и заторфованность свидетельствуют о том, что озеро, в котором начался процесс торфонакопления, было мелким и существовало в течение непродолжительного времени [25].

На контакте торфа и минерального грунта отмечены прослойки чистого льда мощностью от 40 до 130 см, скорее всего, представляющие ледяное ядро бугра. С глубины 4,5 м льдистость резко снижается до 10–20%.





Криотекстура в основном гнездовидная, массивная. Крупные шлиры и включения льда встречены на глубине 5,3–5,5 и 6,6–7,2 м.

Существенное отличие криогенного строения и распределения льдистости бугров пучения, формирующихся в болотах верхового типа от таковых у пальза, растущих в болотах, проходящих стадии развития от низинных к верховым, заключается в том, что льдистые ядра первых имеют неглубокое залегание и формируются в нижней части торфа и/или на контакте торфа с подстилающим минеральным грунтом.

Е.Н. Оспенниковым с соавторами [25] исследованы многолетние бугры пучения в пределах болот Алдано-Тимптонского междуречья. Один из них расположен на водоразделе рек Унгра и Алдакай вблизи озера Амутычи в пределах торфяника, образовавшегося на месте другого озера. При бурении на этом бугре вскрыт торф мощностью более 4 м, мерзлый с глубины 0,5 м. В нем встречен прослой сапропеля, подстилаемый озерной супесью. В торфе отмечены линзовидно-слоистая, линзовидно-сетчатая, атакситовая и крупношлировая криотекстуры (рис. 22).

Отдельные острова ММП с близкой к 0°C среднегодовой температурой и мощностью до 40–50 м могут быть встречены в разных частях Южной Якутии, в частности в районе поселка Беркакит (56°34'22" с.ш., 124°46'30" в.д.) вдоль Амуро-Якутской железнодорожной магистрали и автодороги «Лена» (рис. 23).

В Центральной Якутии и Ангаро-Ленском регионе миграционные бугры пучения на торфяниках широко распространены в долинах мелких рек и на плоских заболоченных водораздельных пространствах [10, 29, 35–37] в таежном Приангарье, в бассейнах рек Лена, Киренга, а также по днищам долин Лено-Манзурского и Кудино-Манзурского междуречий, сложенных сильнопучинистыми суглинисто-глинистыми грунтами [34].

Болота широко распространены в долине, где они приурочены к притеррасным участкам поймы и террасам, в меньшей степени — на водораздельных поверхностях, где развиты в котловинах спущенных и полуспущенных озер (хасыреев). Наиболее крупные болотные массивы расположены в низовьях рек Агапа и Янгода, а также в районе впадения рек Дюрюса и Малая Дюрюса в Агапу. Все эти массивы сильно заозерены вследствие развитого термокарста. Болота представлены всеми стадиями развития полигональных комплексов — от гомогенных травяных до плоскобугристых торфяников. Для поверхностей террас более характерны плоскобугристые болота со значительно заторфованными буграми. В заболоченных хасыреех на водоразделах местами встречаются тундрово-болотные комплексы с крупными торфяно-минеральными выпуклыми буграми высотой до 1,0–1,5 м, чередующимися с пушицево-осоковыми и кустарниково-пушицевыми понижениями.

Говоря о прогнозе состояния бугров, следует упомянуть о том, что Г.В. Малкова с соавторами [19] полагают, что очаги минимальных трендов к потеплению (0,03–0,04°C/год) сконцентрированы на Лено-Оленекском междуречье и в среднем течении реки Енисей. Максимальные тренды (0,06°C/год и более) зафиксированы на юге Сибири и в Центральной Якутии. На



Рис. 23. Бурение скважины для установки мерзлотомера Данилина в мерзлых толщах на южном пределе их распространения в районе поселка Беркакит в юго-восточной части Средней Сибири (фото К. Йошикавы, июль 2012 г.)

юге Якутии, несмотря на сильное потепление климата, сохранилась высокая термическая устойчивость ММП, что объясняется большой изменчивостью толщины снега в последние десятилетия и преимущественной ролью зимнего охлаждения и характера снеготложений в формировании среднегодовых температур грунтов.

Выводы

1. Бугры пучения — одно из самых распространенных криогенных явлений в Средней Сибири благодаря климатическим и гидрологическим особенностям данной территории.
2. В Средней Сибири ареал миграционных бугров пучения в северной части заходит в зону низкотемпературных многолетнемерзлых грунтов со сплошным их распространением.
3. Южный предел ареала бугров пучения в Средней Сибири совпадает с южной границей распространения многолетнемерзлых грунтов и проходит на западе региона южнее 55° с.ш., на востоке — близ широты 56° с.ш.
4. Миграционные бугры пучения существенно осложняют эксплуатацию магистральных трубопроводов, дорог, крупных объектов строительства, аэродромов. ❄️

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 11-05-01141) и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2012–2013 гг. (лот 2012-1.1-12-000-1008, соглашение 8339). Аэровизуальное обследование коридора трассы ТС ВСТО-1 было выполнено Ю.В. Станиловской с коллегами из ИГЭ РАН в апреле–октябре 2011 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.А., Алексеева Н.Г., Копейкин В. В. Результаты георадарного и водородного исследования импактных воронок Тунгусского метеорита в 2009 и 2010 годах // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 12. С. 1105–1108.
2. Алексеев В.А., Копейкин В.В., Алексеева Н.Г., Кривоулин В.В., Пелехань Л.Г., Рукавишников В.А., Чечин В.А. Изучение импактных воронок Тунгусского метеорита // Материалы 4-й Конференции геокриологов России, МГУ, г. Москва, 7-9 июня 2011 г. Т. 1. С. 165–174.
3. Бердников Н.М. Бугры пучения в различных ландшафтах бассейна реки Надым // Криосфера Земли. 2012. № 2. С. 81–86.
4. Бобов Н.Г. Современное образование многолетнемерзлых бугров пучения на Лено-Виллоиском междуречье // Известия АН СССР. Серия геогр. 1960. № 5. С. 64–68.
5. Васильев Н.В. Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908 г. М.: НП ИД «Русская панорама», 2004. 372 с.
6. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов / под ред. Ю.К. Васильчука. М.: Изд-во Московского ун-та, 2008. 571 с.
7. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Миграционные бугры пучения на Европейском Севере России — южный и северный пределы ареала и современная динамика // Инженерная геология. 2011. № 2. С. 56–72.
8. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Миграционные бугры пучения на севере Западной Сибири: южный и северный пределы ареала и современная динамика // Инженерная геология. 2012. № 3. С. 62–78.
9. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Репкина Т.Ю. Миграционные бугры пучения в заполярной части криолитозоны Средней Сибири // Инженерная геология. 2013. № 2. С. 28–45.
10. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / под ред. Е.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 414 с.
11. Драницин Д.А. О некоторых зональных формах рельефа Крайнего Севера // Почвоведение. 1914. № 4. С. 21–68.
12. Карпенко Л.В. Современное состояние болот проектируемой зоны затопления Богучанского водохранилища: материалы временных коллективов // География и природные ресурсы. 2009. № 1. С. 110–116.
13. Кац Н.Я. Типы болот СССР и Западной Европы и их географическое распространение. М.: Гос. изд-во географической литературы, 1948. 318 с.
14. Кашиперюк П.И., Трофимов В.Т. Типы и инженерно-геологическая характеристика многолетнемерзлых торфяных массивов. М.: Изд-во Московского ун-та, 1988. 183 с.
15. Кулик Л.А. Данные по Тунгусскому метеориту к 1939 г. // Доклады Академии наук СССР. 1939. Т. 22. № 8. С. 520–524.
16. Львов Ю.А., Бляхарчук М.А. Мерзлотный торфяник в центре области выпадения вещества Тунгусского метеорита // Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983. С. 84–99.
17. Львов Ю.А., Иванова Г.М. Провальные термокарстовые депрессии на крупнобугристых торфяниках района падения Тунгусского метеорита // Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1963. С. 48–58.
18. Львов Ю.А., Лагутская Л.И., Иванова Г.М., Мильчевский В.И., Райфельд А.Ф., Говорухин В.И., Бояркина А.П. Болота района падения Тунгусского метеорита // Проблема Тунгусского метеорита. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1963. С. 34–47.
19. Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 4. С. 33–36.
20. Мельников В.П., Спасицев В.И. Криогенные образования в литосфере Земли: монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 344 с.
21. Мульдьяров Е.Я., Лапина Е.Д. Датировка верхних слоев торфяной залежи, используемой для изучения космических аэрозолей // Метеоритные и метеорные исследования. Новосибирск: Наука, 1983. С. 75–84.
22. Мульдьяров Е.Я., Лапина Е.Д. Эколого-фитоценотическая характеристика биофлоры района падения Тунгусского метеорита // Следы космических воздействий на Землю. Новосибирск: Наука, 1990. С. 133–140.
23. Оспенников Е.Н. Динамика геокриологических условий болотных массивов юга криолитозоны в голоцене // Материалы 3-й Конференции геокриологов России, МГУ, г. Москва, 1–3 июня 2005 г. Т. 3. С. 203–211.
24. Оспенников Е.Н. Об инверсии радиоуглеродных дат в торфяниках Сибири // Геокриологические исследования. М.: Изд-во Московского ун-та, 1991. С. 29–35.
25. Оспенников Е.Н., Трухи Н.И., Чижов А.Б., Чижова Н.И. Экзогенные геологические процессы и явления. М.: Изд-во Московского ун-та, 1980. 227 с.
26. Пономарева О.М., Гравис А.Г., Бердников Н.М. Современная динамика бугров пучения и плоскобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского стационара) // Криосфера Земли. 2012. № 4. С. 21–30.
27. Попов А.И. Вечная мерзлота в Западной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 230 с.
28. Пьявченко Н.И. К изучению болот Красноярского края // Заболоченные леса и болота Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 5–32.
29. Стамбовская Я.В. Изучение формирования многолетних бугров пучения на низких террасах р. Лены в Центральной Якутии // Материалы Международной молодежной конференции: «Современные проблемы и будущее геокриологии». Якутск. Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2008. С. 26–28.
30. Станисловская Ю.В. Повторно-жильные льды и бугры пучения Южной Якутии и Северного Забайкалья // Дипломная работа. М.: МГУ, 2007. 86 с.
31. Сумгин М.И. Вечная мерзлота почв в пределах СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1937. 379 с.
32. Тьртиков А.П. Формирование и развитие крупнобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири // Мерзлотные исследования. 1966. Вып. 6. С. 144–154.
33. Тьртиков А.П. Лес на северном пределе в Азии. М., 1995. 144 с.
34. Угланов И.Н. Карстовый и мерзлотный рельеф Кудинско-Манзурского междуречья // Труды Иркутского гос. ун-та им. А.А. Жданова. Сер. геогр. 1958. Т. 24. Вып. 1. С. 125–141.
35. Урбан А.А. Особенности формирования процессов мерзлотного пучения на территории Якутии // Материалы 11-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри. Секции 1-2. Нерюнгри: Технический институт ЯГУ, 2010. С. 86–89.
36. Фотиев С.М., Данилова Н.С., Шевелева Н.С. Геокриологические условия Средней Сибири // Дипломная работа. М.: Наука, 148 с.
37. Хруцкий С.Ф. К истории формирования многолетнемерзлых пород и подземных льдов в грабнях Тимптоно-Гонамского района // Мерзлотные исследования. М.: Изд-во Московского ун-та, 1968. Вып. 8. С. 81–88.
38. Шумилова Л.В. О бугристых торфяниках южной части Туруханского края // Известия Томского отделения Русского ботанического общества. 1931. Т. 3. С. 1–13.
39. Akerman J. Observations of palsas within the continuous permafrost zone in eastern Siberia and in Svalbard // Geografisk Tidsskrift. 1982. № 82. P. 45–51.
40. Cyr S., Payette S. The origin and structure of wooded permafrost mounds at the arctic treeline in eastern Canada // Plant Ecology and Diversity. 2010. V. 3. № 1. P. 35–46.
41. Kolesnikov E.M., Kolesnikova N.V., Boettger T. Isotopic anomaly in peat nitrogen is a probable trace of acid rains caused by 1908 Tunguska bolide // Planetary and Space Science. 1998. V. 46. № 2–3. P. 163–167.
42. Kolesnikov E.M., Longo G., Boettger T., Kolesnikova N.V., Gioacchini P., Forlani L., Giampieri R., Serra R. Isotopic geochemical study of nitrogen and carbon in peat from the Tunguska Cosmic Body explosion site // Icarus. 2003. V. 161. P. 235–243.
43. Vasilchuk Yu.K., Vasilchuk A.C. The ¹⁴C age of palsas in Northern Eurasia // Radiocarbon. 1998. V. 40. № 2. P. 895–904.
44. Wu Z., Barosh P.J., Wang L., Hu D., Wang W. Numerical modeling of stress and strain associated with the bending of an oil pipeline by a migrating pingo in the permafrost region of the northern Tibetan Plateau // Engineering Geology. 2008. V. 96. № 1–2. P. 62–77.



ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ВЛАГИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ УРАЛЬСКОГО БЕРЕГА БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ

THERMAL PROPERTIES AND PHASE COMPOSITION OF THE WATER IN FROZEN SOILS OF THE BAYDARATSKAYA BAY URAL COAST

АЛЕКСЮТИНА Д.М.

Аспирант кафедры геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, e21tb@mail.ru

МОТЕНКО Р.Г.

Старший научный сотрудник кафедры геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., доцент, rmotenko@mail.ru

ALEKSYUTINA D.M.

Postgraduate student of geocryology department, geology faculty, Lomonosov Moscow State University, e21tb@mail.ru

MOTENKO R.G.

Senior researcher of geocryology department, geology faculty, Lomonosov Moscow State University, Ph.D. (candidate of geological and mineralogical sciences), rmotenko@mail.ru

Ключевые слова:

мерзлые грунты; теплофизические свойства; фазовый состав; незамерзшая вода; коэффициент теплопроводности; коэффициент температуропроводности; теплоемкость; температура начала замерзания; криогенное строение; Байдарацкая губа; Уральский берег.

Key words:

frozen soils; thermal properties; phase composition; unfrozen water; thermal conductivity; thermal diffusivity; heat capacity; freezing temperature; cryogenic structure; Baydaratskaya Bay; Ural Coast.

Аннотация

В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований состава, строения и свойств мерзлых грунтов на Уральском берегу Байдарацкой губы. Обсуждаются и анализируются выявленные закономерности изменений теплофизических свойств и фазового состава влаги мерзлых грунтов разного гранулометрического и химико-минерального состава. Проводится сопоставление данных, полученных в полевых и лабораторных условиях.

Введение

Прибрежная зона арктических морей является очень динамичной системой в связи с развитием там многолетнемерзлых грунтов. В настоящее время существуют проблемы изучения взаимодействия вечномерзлых пород суши с морем при освоении северных территорий, например при строительстве береговых сооружений, подводных трубопроводов и пр. Поэтому оценка разрушения берега является достаточно актуальной задачей.

Представленная в настоящей статье работа является частью международного проекта SAMCoT (Sustainable Arctic Marine and Coastal Technology), который предусматривает многолетние многоплановые исследования в Арктике, включающие в том числе прогноз разрушения берегов. Составление прогноза развития этих процессов невозможно без знаний состава и свойств мерзлых пород. В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств и фазового состава влаги мерзлых грунтов.

Исследования проводились на побережье Байдарацкой губы Карского моря (рис. 1). Для данного района характерны суровая продолжительная зима с длительным залеганием снежного покрова, короткие переходные сезоны (весна и осень), короткое холодное лето, поздние весенние и ранние осенние заморозки. Средняя годовая температура воздуха имеет отрицательные значения ($-7 \div -10^\circ\text{C}$). Исследуемая территория относится к району сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Сплошность криолитозоны нарушается с поверхности несквозными подозерными и подрусловыми таликами, а по разрезу — линзами и массивами охлажденных пород и криопэггов. На пляжах и лайдах мерзлые грунты по разрезу чередуются с охлажденными. Мощность мерзлых пород в пределах пляжей

Abstract

The paper considers experimental results on the composition, structure and properties of the frozen soils at the Ural Coast of the Baydaratskaya Bay. Thermal properties, phase composition of water of frozen soils with different grain-size, chemical-mineral composition and comparison of field and laboratory data are discussed and analyzed.



и береговых баров составляет 2–8 м. На лайдах она меняется от 0 м на заливаемых во время приливов участках до 5–10 м и более в приподнятых местах. Под мерзлыми грунтами залегают охлажденные отложения, которые подстилаются горизонтом реликтовых мерзлых толщ. В пределах первых террас их мощность возрастает до 40–100 м, ниже залегает регионально выдержанный горизонт грунтов мощностью 100–150 м, охлажденных до минус 1 — минус 3°C. Наиболее низкая среднегодовая температура грунтов свойственна выпуклым обдаваемым ветром участкам суши, на которых плотность снежного покрова максимальна, а его мощность незначительна. В их границах на склонах и в прибрежной части первой морской террасы среднегодовая температура грунтов составляет минус 6,2 — минус 7,0°C. В понижениях террас и лайд с повышением снегонакопления температура грунтов изменяется от минус 2,4 до минус 4,7°C. Глубина сезонного протаивания грунтов изменяется от 0,2 до 1,5 м [1, 8].

В криолитозоне берега морей подвергаются воздействию двух основных процессов — термоденудации и термоабразии [7]. По мнению некоторых исследователей таких территорий, разрушение берегов происходит преимущественно вследствие термоденудации. Основная часть обломочного материала (70–75%) поступает в море в рыхлом состоянии под воздействием гидродинамических факторов, и только 25–30% приходится на размыв мерзлой толщи. За короткий период теплого времени года оттаявший материал накапливается у подножий береговых откосов, а волны и течения в периоды осенних штормовых нагонов уносят его в море, возобновляя тем самым новый цикл разрушения [8, 9].

На исследуемой территории были выбраны два участка. Основное различие между ними связано с разной высотой разрушающегося берегового уступа (4–6 и 10–15 м) и составом слагающих его пород. Летом 2012 г. исследования проводились лишь на одной площадке, на которой выделяются несколько геоморфологических уровней: морская терраса, пляж, лайда. Высота морской террасы составляет 4–5 м. Поверхность террасы неровная, осложнена обширными озерными котловинами на разных стадиях развития. Разрез представлен переслаиванием суглинков, супесей и песков. Лайды представляют собой обширные сильно заболоченные и заозеренные пространства, подвергающиеся действию приливов и отливов. Пляж представляет собой ровную слабонаклонную песчаную поверхность, полностью лишенную растительности. Среднегодовая температура многолетнемерзлых грунтов составляет минус 4,7°C.

Методы и объекты исследований

В ходе полевых работ на различных участках морской террасы было пробурено три скважины глубиной от 2,0 до 6,5 м. Первая и вторая скважины бурились близко друг от друга (рис. 2) и располагались между ледяными жилами, а третья была расположена над ледяной жилой, вскрытой в береговом обрыве. Весь извлекаемый керн (рис. 3) описывался и герметично упаковывался. Всего было отобрано 29 мерзлых монолитов, которые помещались в холодильную камеру, а после окончания буровых работ транспортировались в мерзлом состоянии для дальнейших лабораторных ис-



Рис. 1. Космический снимок и положение на карте территории исследований (выделена красным цветом) (<http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/50027>, <http://maps.yandex.ru>)



Рис. 2. Бурение скважины № 2 (фото С. Булдовича)

следований. Кроме того, было отобрано восемь образцов нарушенного сложения, пять из которых отбирались с эрозионного склона морской террасы.

Влажность и плотность взятых образцов изменялись в большом диапазоне (см. таблицу): влажность варьировала от 16,4 до 204,3%, плотность — от 1,15 до



Рис. 3. Керн из скважины № 1. Хорошо видны ледяные шлиры (фото Д. Алексютиной)



2,02 г/см³. Большая часть грунтов предположительно имеет озерно-болотное происхождение. Образцы, взятые с глубины более 5,0 м, имеют, по-видимому, морской генезис. Для них была оценена засоленность D_{sal} изменяющаяся от 0,7 до 1,0%.

Теплофизические свойства грунтов определялись в полевых и лабораторных условиях. Полевые определения коэффициента теплопроводности (λ) проводились на эрозионном склоне первой морской террасы с помощью прибора МИТ-1. Принцип действия этого

прибора основан на измерении изменения температуры зонда за определенное время при его нагреве с постоянной мощностью [5]. Рабочий диапазон температур составляет от минус 10 до плюс 50°C, диапазон измерения теплопроводности равен 0,03–2,00 Вт/(м·К). Относительная погрешность составляет $\pm 7,0\%$. Зонд имеет диаметр 6,0 мм и длину 12 мм. Для обеспечения максимального теплового контакта с массивом грунта он смазывается вазелином. Время выдержки зонда перед измерением — не менее 2 ч. Измерения коэффи-

Таблица

Характеристика образцов								
Место отбора образца	№ обр.	Глубина, м	Грунт (геол. индекс IвQIV)	Криогенная текстура	Влажность $W_{юр}$ %	Плотность ρ , г/см ³	Льдистость i , д.е.	
Скважина №	1	1*	0,15–0,28	суглинок	массивная	46,2	1,55	0,49
		2	0,45–0,50	супесь		27,9	1,86	0,33
		3	0,50–0,60	торф	порфировая	76,4	1,43	0,63
		4*	0,60–0,67	супесь заторфованная		86,2	1,45	0,69
		5	0,70–0,80	супесь	порфировая	90,3	1,37	0,66
		6*	0,80–0,90			107,4	1,39	0,76
		7	0,90–1,00			83,9	1,39	0,65
		8*	1,00–1,10	суглинок	атакситовая	204,3	1,15	0,83
		9	1,10–1,20			порфировая	82,3	1,40
		10	1,20–1,25	супесь	порфировая	159,1	1,20	0,79
		11*	1,25–1,38			161,7	1,24	0,83
		12	1,55–1,65		линзовидная	62,6	1,51	0,58
		13*	1,70–1,80			89,1	1,65	0,84
		14	1,80–1,90			24,7	1,91	0,34
	15*	1,50–1,65	порфировая			116,2	1,31	0,73
	2	16	2,00–2,20	супесь	линзовидная	40,8	1,69	0,48
		17	2,50–2,60		массивная	41,9	1,68	0,46
		18*	3,15–3,30		линзовидная	36,4	1,77	0,42
		19*	0,30–0,45		суглинок	массивная	48,1	1,61
	3	20	0,50–0,60	торф	порфировая	148,4	1,22	0,77
		21*	1,30–1,45	супесь	массивная	72,0	1,51	0,68
		22	1,90–2,15			43,0	1,67	0,47
		23*	2,80–3,05	супесь с торфом	слоистая	80,2	1,47	0,70
		24	3,30–3,60	супесь	линзовидная	26,9	1,87	0,35
		25	3,60–3,85	супесь	массивная	32,9	1,78	0,39
		26*	3,95–4,05	песок	линзовидная	24,9	1,92	0,40
		27	4,05–4,30	песок	массивная	21,3	1,97	0,39
		28	4,55–4,80	супесь		29,4	1,83	0,37
		29*	5,00–5,20	супесь		33,4	1,76	0,34
		30*	5,20–5,30	суглинок	-	40,0	1,30	0,26
		31*	5,40–5,55	супесь	-	32,9	1,45	0,25
		32*	6,25–6,30	песок	-	18,6	1,55	0,21
Эрозионный склон		33*	0,40–0,60	супесь	-	17,6	2,02	0,30
	34*	0,10–0,30	торф	-	114,2	1,19	0,65	
	35*	0,20–0,30		-	531,	0,87	0,78	
	36*	1,00–1,20	песок	-	16,4	1,69	0,25	
	37*	1,30–1,50		-	17,5	2,03	0,32	

* Монолиты, которые использовались для проведения экспериментальных исследований теплофизических свойств и фазового состава влаги мерзлых грунтов.



циента теплопроводности проводились при положительных и отрицательных температурах. В точках опробования устанавливались влажность и плотность, а также отбирались образцы для лабораторных исследований (см. таблицу, образцы № 33–37).

В лаборатории теплофизические свойства мерзлых грунтов определялись методом регулярного режима первого рода [5]. Этот метод основан на том, что при охлаждении или нагревании тела в среде с постоянной температурой все его точки стремятся принять температуру данной среды. Теория метода строго обоснована для случая, когда в процессе эксперимента в образце отсутствуют источники поглощения (выделения) тепла. Достоинствами метода являются простота технического осуществления, малое время эксперимента и вследствие этого возможность серийных исследований. Эксперименты проводятся с двойной повторностью на двух параллельных образцах, что позволяет повысить точность определения искомых характеристик. Различие результатов параллельных определений не должно превышать $\pm 5\%$. В противном случае проводятся дополнительные эксперименты, что позволяет получать каждую экспериментальную точку путем осреднения результатов 4–6 опытов. Для исследования образцы вырезались из монолитов мерзлого грунта специальными металлическими формами диаметром $d = 3$ см и высотой $h = 4$ см (для песков $d = 4$ см и $h = 6$ см). В геометрическом центре образца устанавливался рабочий спай хромель-копелевой термопары. Образцы герметизировались и выставлялись при отрицательной температуре в течение суток, а затем проводились эксперименты.

Эти же образцы использовались для определения температуры оттаивания (замерзания) t_{bf} криоскопическим методом [6]. Данный метод основан на выделении скрытой теплоты кристаллизации (или же поглощении теплоты плавления). Цикл оттаивания проводится в воздушной среде при комнатной температуре. После оттаивания образцы разделяются и устанавливается их плотность и влажность.

Теплоемкость C в данных исследованиях рассчитывалась по известным аддитивным соотношениям через удельные доли составляющих породу компонентов. Для расчетов использовались экспериментально полученные значения влажности и содержания незамерзшей воды. Значения теплоемкости воды, льда и грунта брались по литературным данным [5, 7].

Содержание незамерзшей воды (W_w) в мерзлых образцах определялось при комбинированном использовании контактного и криоскопического методов [2, 6].

Контактный метод основан на принципе динамического равновесия между льдом, незамерзшей водой и паром (принципе Н.А. Цытовича) [5]. Достоинствами этого метода являются простота, доступность, высокая производительность и широкий температурный диапазон применения. Для получения значений W_w при заданной температуре изготовлялось по две-три пластины размером $30 \times 40 \times 5$ мм. Они высушивались при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Параллельно приготавливались пластины из льда аналогичных размеров.

Пластины выдерживались в холодильной камере, после чего собирались вместе так, чтобы образовалась слоистая кассета и каждая сухая пластина контактиро-

вала с двумя пластинами льда. Образцы закладывались в холодильные шкафы с заданными значениями отрицательных температур ($-2 \div -20,5^\circ\text{C}$), а через несколько дней разделялись и высушивались.

Криоскопический метод определения фазового состава влаги основан на зависимости температуры начала замерзания породы от ее влажности. Эксперимент заключается в том, чтобы точно установить эту температуру и ее зависимость от влажности грунта. При этом надо учитывать, что содержание незамерзшей воды в мерзлом грунте при температуре t_o равно той влажности грунта, которой соответствует температура его замерзания или оттаивания. Следует подчеркнуть, что для мерзлых грунтов нужно проводить определение именно температуры оттаивания, чтобы избежать погрешностей, связанных с переохлаждением [2, 6]. Для незасоленных пород температурной границей применимости данной методики является значение температуры от минус 1 до минус 3°C . Для тонкодисперсных и засоленных грунтов эта граница сдвигается в область более низких температур. При исследовании засоленных грунтов температурный интервал, в котором происходит вымерзание (оттаивание) порового раствора, увеличивается с ростом концентрации последнего. Точность определения температуры оставляет $\pm 0,03^\circ\text{C}$.

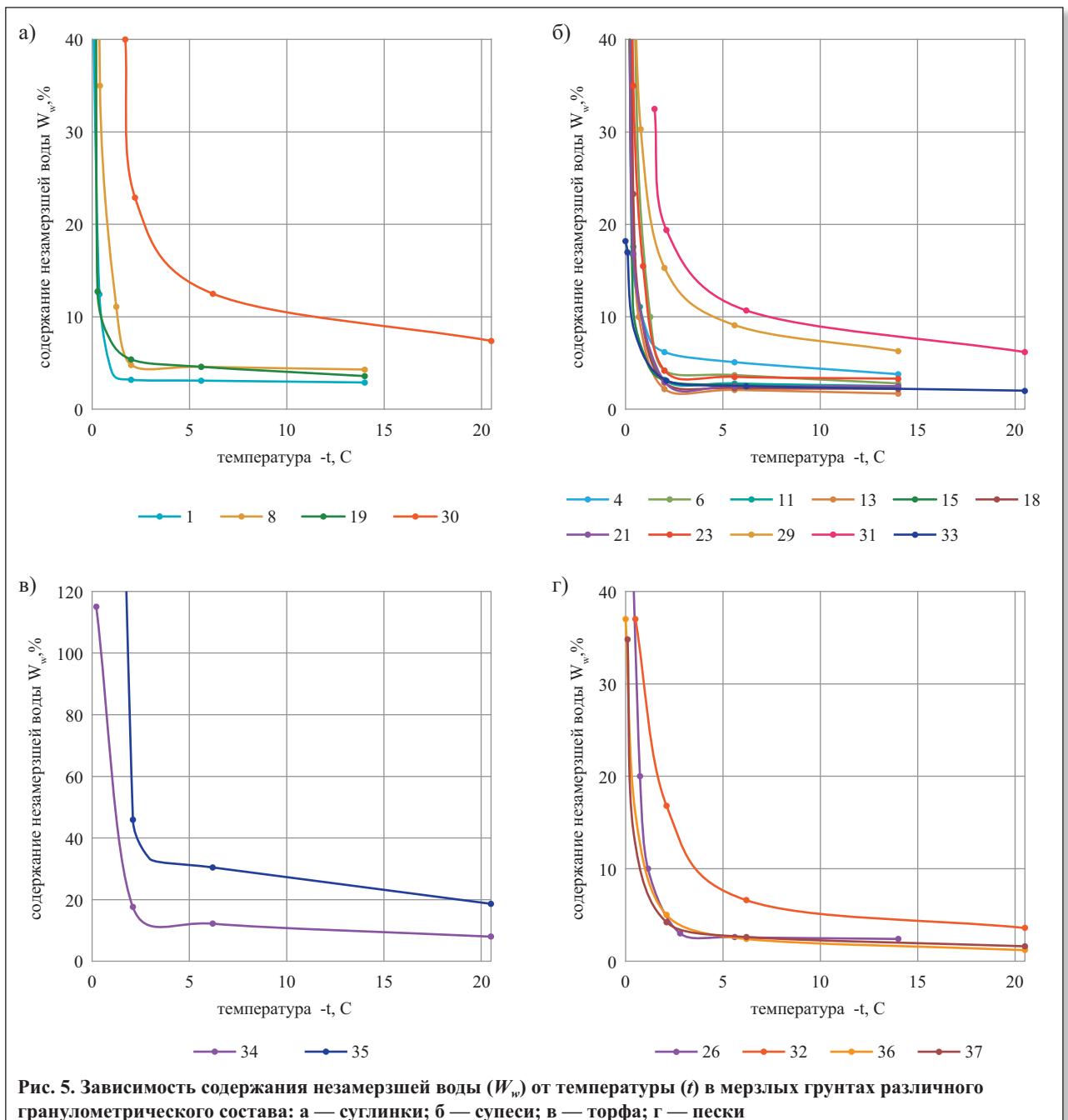
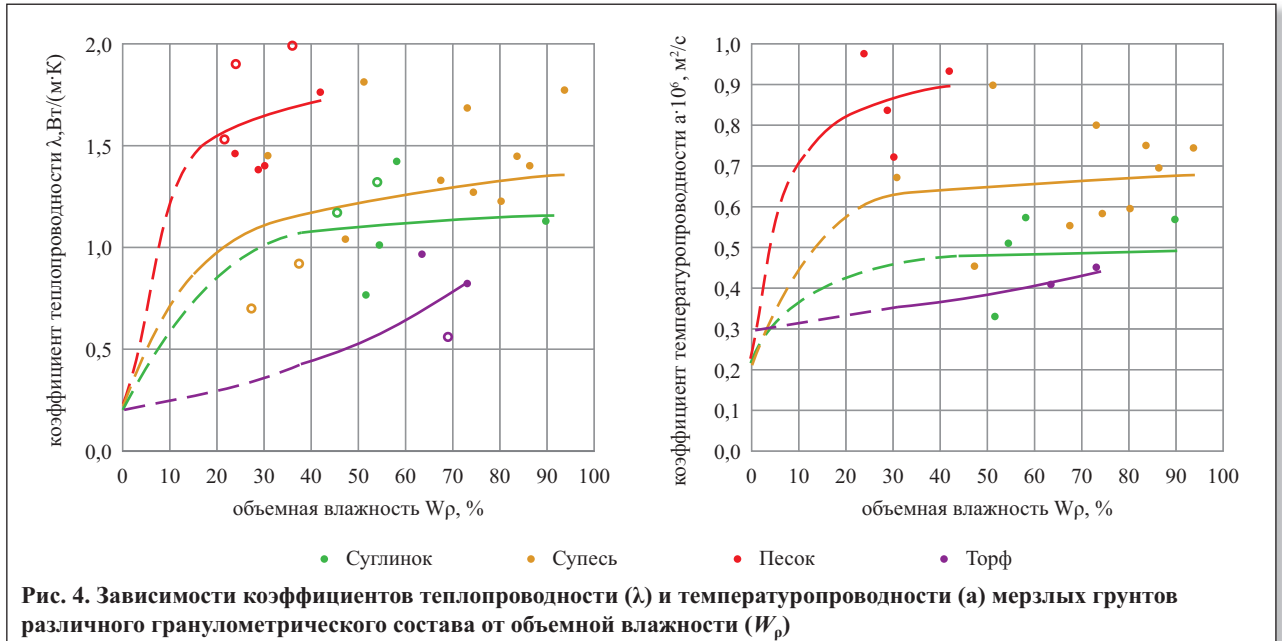
Образцы грунта с заданной влажностью промораживаются при минус 20 — минус 30°C . Заданная скорость промерзания обеспечивает массивную криогенную текстуру образцов. Температурным датчиком служит хромель-копелевая термопара. После окончания эксперимента образцы разделяются на две части и высушиваются при 105°C . Затем весовым методом определяется их влажность.

Результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств

Лабораторные исследования проводились на наиболее типичных для данного района образцах естественного сложения, приготовленных из монолитов, отобранных при бурении, а также на образцах нарушенного сложения, взятых на эрозионном склоне в точке полевых определений коэффициента теплопроводности. На рисунке 4 представлены результаты исследования теплопроводности λ и температуропроводности a мерзлых грунтов различного гранулометрического состава. Влажность и плотность образцов изменяются в широком диапазоне (см. таблицу), поэтому результаты экспериментальных исследований были обобщены в зависимости от объемной влажности $W_p = W \cdot \rho_d / \rho_i$ (где W — весовая влажность, %; ρ_d , ρ_i — соответственно плотность скелета грунта и льда, $\text{кг}/\text{м}^3$).

Незатемненными точками на графике (см. рис. 4) показаны результаты полевых исследований. Из-за недостаточности данных во всем диапазоне влажности пунктиром показан предполагаемый ход зависимостей. Для всех грунтов для коэффициента теплопроводности величина достоверности аппроксимации $R^2 > 0,8$.

В мерзлой супеси величина λ изменяется от 1,04 до 1,81 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ в диапазоне изменения объемной влажности от 30 до 94%. Суглинок представлен малым количеством исследуемых образцов. Значения λ для мерзлых суглинков изменяются от 0,77 до 1,42 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$





при изменении W_p от 55 до 90%. В монографии «Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал» [4] приводятся данные по теплофизическим характеристикам засоленных и незасоленных грунтов региона, схожего с районом исследований. Коэффициент теплопроводности мерзлых песчано-глинистых грунтов изменяется в диапазоне от 1,12 до 2,62 Вт/(м·К). Столь большой разброс значений связан с «пестротой» литологического состава верхних горизонтов криогенных толщ [4].

Низкие значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности в мерзлых грунтах различного гранулометрического состава в большинстве случаев связаны с их заторфованностью и засоленностью и, соответственно, с большим содержанием незамерзшей воды. Сопоставление данных, полученных в лабораторных и полевых условиях, показало различия около 12–15%.

Результаты исследований фазового состава влаги мерзлых грунтов

Были проведены исследования фазового состава влаги мерзлых грунтов, отобранных из скважин № 1, 2, 3 и с эрозионного склона. На рисунке 5 представлены результаты исследования W_w в зависимости от температуры для грунтов различного гранулометрического состава.

Проанализируем полученные результаты по содержанию незамерзшей воды при среднегодовой температуре грунтов минус 4,7°C. В мерзлых незасоленных суглинках (см. рис. 5, а) оно изменяется от 3 до 5%, в засоленных суглинках с глубины 5,2–5,3 м его максимальное значение составляет 14%. В мерзлых незасоленных супесях W_w изменяется от 2 до 5%, в засоленных — от 10 до 13% (см. рис. 5, б). В торфах количество незамерзшей воды изменяется в большом диапазоне — от 15 до 33%. Столь большие различия связаны с зольностью и степенью разложения торфов (см. рис. 5, в). Для незасоленных песков содержание незамерзшей воды составляет около 1%, а для засоленных — около 5% (см. рис. 5, г).

По литературным данным [3, 4, 8], содержание незамерзшей воды при той же температуре в незасоленных супесях изменяется от 1,5 до 3,5%, а в засоленных — от 3 до 11%. Содержание незамерзшей воды при температуре минус 4,7°C в незасоленных и слабозасоленных пылеватых песках Бованенковского месторождения [4] изменяется от 1 до 2,2%, а в засоленных (при близком значении засоления D_{sal}) оно увеличивается до 4%. Небольшой разброс данных по фазовому составу влаги связан с природным разнообразием мерзлых грунтов.

Для практического использования было проведено обобщение полученных результатов исследования фазового состава влаги для мерзлых грунтов разного гранулометрического состава (рис. 6). Были выявлены диапазоны изменения в них количества незамерзшей воды.

Содержание незамерзшей воды для всех исследуемых грунтов изменяется в большом диапазоне из-за различий в дисперсности и химико-минеральном составе. Максимальные значения W_w характерны для торфов, минимальные — для незасоленных песков.

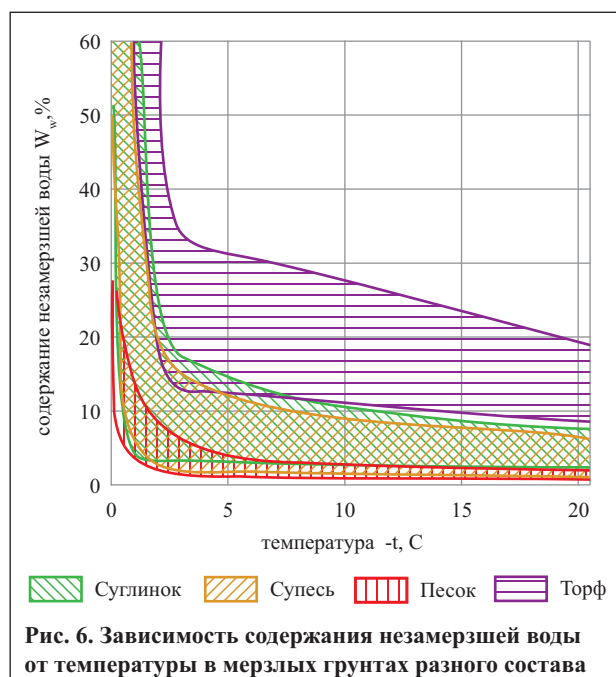
Полученные данные по свойствам, криогенному строению и составу отобранных образцов были проанализированы по глубине скважин № 1, 2 и 3. Посколь-

ку скважины № 1 и 2 располагались в 2 м друг от друга, для них была построена одна сводная колонка (рис. 7).

На рисунке 7 видно, что у суглинка с атакситовой криогенной текстурой влажность максимальна и составляет 200%, ниже по разрезу влажность уменьшается. Плотность, наоборот, в более дисперсных грунтах имеет меньшие значения. Содержание незамерзшей воды изменяется от 2 до 5%, максимальное значение W_w (около 5%) — в заторфованной супеши и в суглинке. Теплоемкость C непосредственно связана с дисперсностью и фазовым составом влаги и в мерзлых грунтах изменяется от 1350 до 1750 Дж/(кг·К). Наибольшие значения — у суглинка и заторфованной супеши. Увеличение W_w в грунте приводит к понижению λ из-за уменьшения количества более теплопроводного льда. Теплопроводность увеличивается с глубиной до 1,8 Вт/м·К. Температура начала замерзания грунтов (t_{bf}) примерно одинакова и равна минус 0,2°C, кроме случая с супестью с глубины 3,2 м, для которой $t_{bf} = -0,48^\circ\text{C}$ (такое значение связано с небольшим засолением данного грунта, т.е. $D_{sal} = 0,14\%$).

На рисунке 8 представлены состав, строение и свойства грунтов скважины № 3. Торф имеет максимальную влажность 148% и минимальную плотность 1210 кг/м³ (не считая ледяной жилы под ним). Естественная плотность грунта изменяется с глубиной в среднем от 1500 до 2000 кг/м³. Количество незамерзшей воды практически не меняется до глубины 5 м, а ниже видно его значительное увеличение (до 14%). Температура замерзания изменяется от минус 0,1 до минус 0,2°C. Глубже 5 м в связи с засолением значения t_{bf} понижаются от минус 0,5°C до минус 1,7°C. Теплофизические характеристики также изменяются с глубиной. Максимальные значения λ характерны для песка. Уменьшение коэффициента теплопроводности грунтов на глубине более 5 м связано с высоким содержанием в них незамерзшей воды. Теплоемкость также понижается с глубиной, т.к. песчаные грунты имеют наименьшие значения C — от 920 до 1000 Дж/(кг·К).

При сравнении результатов исследований по скважинам № 1 и 2 с данными по скважине № 3 видно,



что литологический состав пород в последней более однородный и песчаный. В первой и второй скважинах грунты до глубины 1,7 м имеют следующие средние значения физических свойств: влажность около 100%, плотность 1400 кг/м³. Ниже по разрезу влажность грунтов понижается до 35%, плотность увеличивается до 1750 кг/м³. В третьей скважине достаточно сильные изменения физических свойств наблюдаются на глубине 3,2 м от поверхности земли. В верхней части средняя влажность грунта составляет около 78%, плотность — 1500 кг/м³, а ниже влажность равна 30% при среднем значении плотности 1750 кг/м³.

Полученные результаты слегка отличаются от данных, представленных в монографии «Инженерная геология России» [3], в соответствии с которыми наиболее часто встречаемые значения влажности грунтов для рассматриваемого региона значительно ниже и изменяются от 20 до 30%, а средние значения плотности, наоборот, выше и варьируют от 1700 до 2100 кг/м³.

Выводы

В данной работе определены свойства пород различного гранулометрического состава в диапазонах наблюдавшихся изменений их влажности и плотности. Диапазон влажности для суглинков составляет от 40 до 204%, для супесей — от 25 до 162%, для торфов — от 114 до 531%, для песков — от 17 до 25%. Плотность суглинков изменяется от 1150 до 1610 кг/м³, супесей — от 1200 до 1900 кг/м³, торфов — от 870 до 1200 кг/м³, песков — от 1550 до 2030 кг/м³. Значение объемной влажности W_p суглинков варьирует от 52 до

90%, супесей — от 31 до 94%, торфов — от 63 до 74%, песков — от 24 до 42%.

Проведены экспериментальные исследования, получены значения и выявлены закономерности изменений теплофизических характеристик мерзлых пород. Проведено обобщение полученных данных по определению коэффициентов теплопроводности и температуропроводности в зависимости от объемной влажности. Для суглинков коэффициент теплопроводности варьирует от 0,77 до 1,42 Вт/м·К, для супесей — от 1,04 до 1,81 Вт/м·К, для песков — от 1,38 до 1,76 Вт/м·К, для торфов — от 0,56 до 0,97 Вт/м·К. Коэффициент температуропроводности суглинков изменяется от $0,331 \cdot 10^{-6}$ до $0,573 \cdot 10^{-6}$ м²/с, супесей — от $0,454 \cdot 10^{-6}$ до $0,898 \cdot 10^{-6}$ м²/с, песков — от $0,722 \cdot 10^{-6}$ до $0,933 \cdot 10^{-6}$ м²/с, торфов — от $0,409 \cdot 10^{-6}$ до $0,554 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Теплоемкость суглинков изменяется от 1280 до 1730 Дж/(кг·К), супесей — от 1000 до 1600 Дж/(кг·К), песков от 870 до 1000 Дж/(кг·К), торфов — от 1980 до 2100 Дж/(кг·К).

Проведено сопоставление результатов, полученных при полевых и лабораторных исследованиях. Разброс значений составил около 12–15%, что связано с природной изменчивостью грунтов.

Выполнены экспериментальные исследования и получены зависимости содержания незамерзшей воды (W_w) во всех исследуемых грунтах в зависимости от температуры (в диапазоне отрицательных температур от 0 до минус 20°C). Проведено обобщение полученных результатов для грунтов разного гранулометрического и химико-минерального состава. Максимальные значения W_w получены для засоленных грунтов. Наибольший диапазон изменений содержания незамерзшей воды выявлен в торфах.

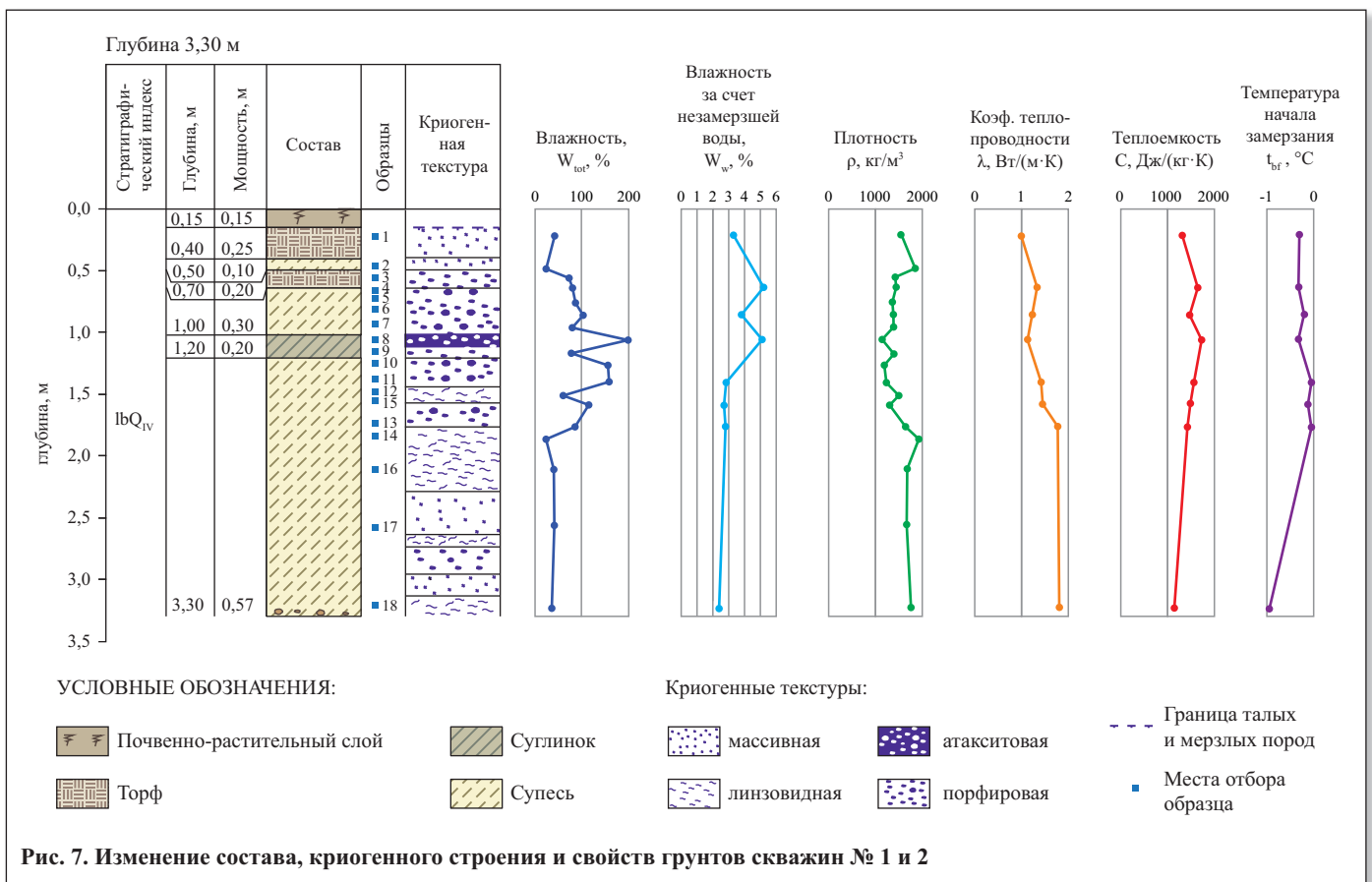
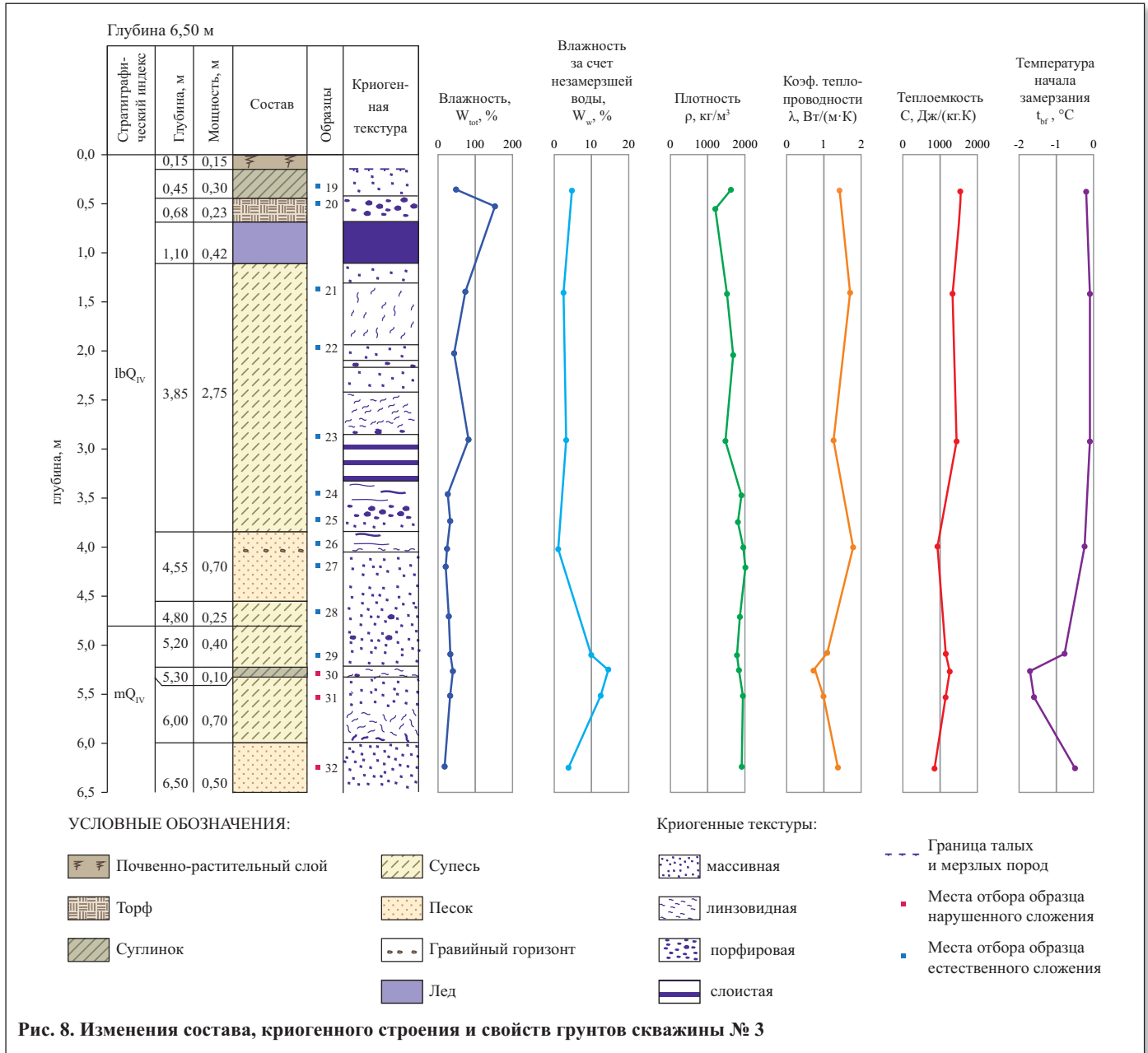


Рис. 7. Изменение состава, криогенного строения и свойств грунтов скважин № 1 и 2



Определена температура начала замерзания грунтов t_{bf} : $-1,7^{\circ}\text{C}$ для суглинков; $-1,6^{\circ}\text{C}$ для супесей; $-0,5^{\circ}\text{C}$ для песков. Самые низкие значения t_{bf} характерны для засоленных грунтов. Изучены состав, строение и свойства грунтов по скважинам, выявля-

ны изменения их теплофизических характеристик по глубине и сопоставлены с криогенным строением, литологией пород и их физическими свойствами. Полученные данные слегка отличаются от литературных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геокриология СССР. Западная Сибирь. М.: Недра, 1989.
2. Еришов Э.Д., Мотенко Р.Г., Комаров И.А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств и фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // Геозкология. 1999. № 3. С. 232–242.
3. Инженерная геология России. Т. 1: Грунты России / под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. М.: КДУ, 2011. 672 с.
4. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: в 3 т. Т. 2: Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / под ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: ООО «Газпром Экспо», 2013. 424 с.
5. Методы геокриологических исследований: учебное пособие / под ред. Э.Д. Еришова. М.: Изд-во МГУ, 2004. 512 с.
6. Мотенко Р.Г., Комаров И.А. Результаты экспериментальных исследований фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // Материалы 1-й Конференции геокриологов России. Кн. 2. М., 1996. С. 287–291.
7. Основы геокриологии. Ч. 6: Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне / под ред. Э.Д. Еришова. М.: Изд-во МГУ, 2008. 766 с.
8. Природные условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал — Центр / В.В. Баулин, Г.И. Дубиков, И.А. Комаров, М.М. Корейша, С.Ю. Пармузин. М.: ГЕОС, 1997. 432 с.
9. Совершаев В.А. Задачи изучения морских берегов в криолитозоне в целях рационального хозяйственного освоения // Материалы 1-й Конференции геокриологов России. Кн. 3: Динамическая геокриология. М., 1996. С. 494–503.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ НАЛЕДИ НА УЧАСТКЕ НЕФТЕПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ

ENGINEERING-GEOLOGICAL MONITORING OF THE DEVELOPMENT AND FORMATION FEATURES OF AN ICING IN AN OIL PIPELINE SYSTEM AREA

ГРИБ Н.Н.

Заместитель директора по научно-исследовательской работе
Технического института (филиала в г. Нерюнгри) Северо-Восточного
федерального университета имени М.К. Аммосова (ТИ (ф) СВФУ),
г. Нерюнгри, д.т.н., профессор, grib@nfygu.ru

СЯСЬКО А.А.

Начальник отдела информационных технологий и безопасности ТИ (ф)
СВФУ, к.т.н., г. Нерюнгри

КУЗНЕЦОВ П.Ю.

Заведующий отделом научных исследований и инновационной
деятельности ТИ (ф) СВФУ, к.г.-м.н., доцент, г. Нерюнгри,
KuznetsovPU@gmail.com

ПАВЛОВ С.С.

Директор ТИ (ф) СВФУ, к.г.-м.н., г. Нерюнгри

КАЧАЕВ А.В.

Заведующий лабораторией физики мерзлых пород ТИ (ф) СВФУ,
г. Нерюнгри

GRIB N.N.

The deputy director for research work of the Technical Institute
(the branch in Neryungri) of the M.K. Ammosov Northeastern Federal
University (TI (b) NEFU), PhD (candidate of science in Technics),
professor, Neryungri, grib@nfygu.ru

SYASKO A.A.

The head of the Section of Information Technologies and Data Security
of the TI (b) NEFU, PhD (candidate of science in Technics), Neryungri

KUZNETSOV P.YU.

The head of the Section of Research and Innovative Activities of the
TI (b) NEFU, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy),
associate professor, Neryungri, KuznetsovPU@gmail.com

PAVLOV S.S.

The director of the TI (b) NEFU, PhD (candidate of science in Geology
and Mineralogy), Neryungri

KACHAEV A.V.

The head of the Laboratory of Frozen Rock Physics of the TI (b) NEFU, Neryungri

Ключевые слова:

нефтепроводная система; водоприток; наледь грунтовых вод;
температурный режим; геоэлектрический разрез.

Key words:

oil pipeline system; water inflow; groundwater icing; temperature
regime; geoelectric section.

Аннотация

По результатам инженерно-геологического мониторинга особенностей развития и формирования наледи на участке нефтепроводной системы установлено, что основной водоприток при ее образовании происходит по траншее нефтепровода. Происхождение этих вод является надмерзлотным, но из-за близости Чульмаканского разлома вероятно поступление в траншею также подмерзлотных вод.

Целью выполненных авторами исследований на объекте трубопроводной системы Восточная Сибирь — Тихий океан, проходящей по территории Южной Якутии, являлось выяснение природы наледообразования в зоне расположения технических и производственных сооружений для дальнейшей разработки мероприятий, обеспечивающих безаварийную эксплуатацию вышеупомянутой системы.

Размер рассматриваемой наледи в плане примерно составляет от 100×120 до 100×150 м, ее максимальная мощность равна 1,9 м, средняя мощность — 1,0 м, объем — около 12 000 м³. По площади и объему она относится к средним наледям [1]. По результатам режимных наблюдений [2] выявлено, что рост наледей на рассматриваемой территории начинается в октябре–ноябре и продолжается в течение всей зимы.

Место наблюдаемой наледи (рис. 1) в классификации подобных объектов должно отражать основные особенности ее генезиса, ее тип и соответствующие особенности развития и формирования. Перечисленным требованиям наиболее хорошо соответствует классификация наледей, представленная в словаре-справочнике [1].

Причиной образования наледей грунтовых вод является нарушение естественного режима грунтового потока в результате сезонного промерзания или строительных работ. При промерзании в фильтрационном потоке

Abstract

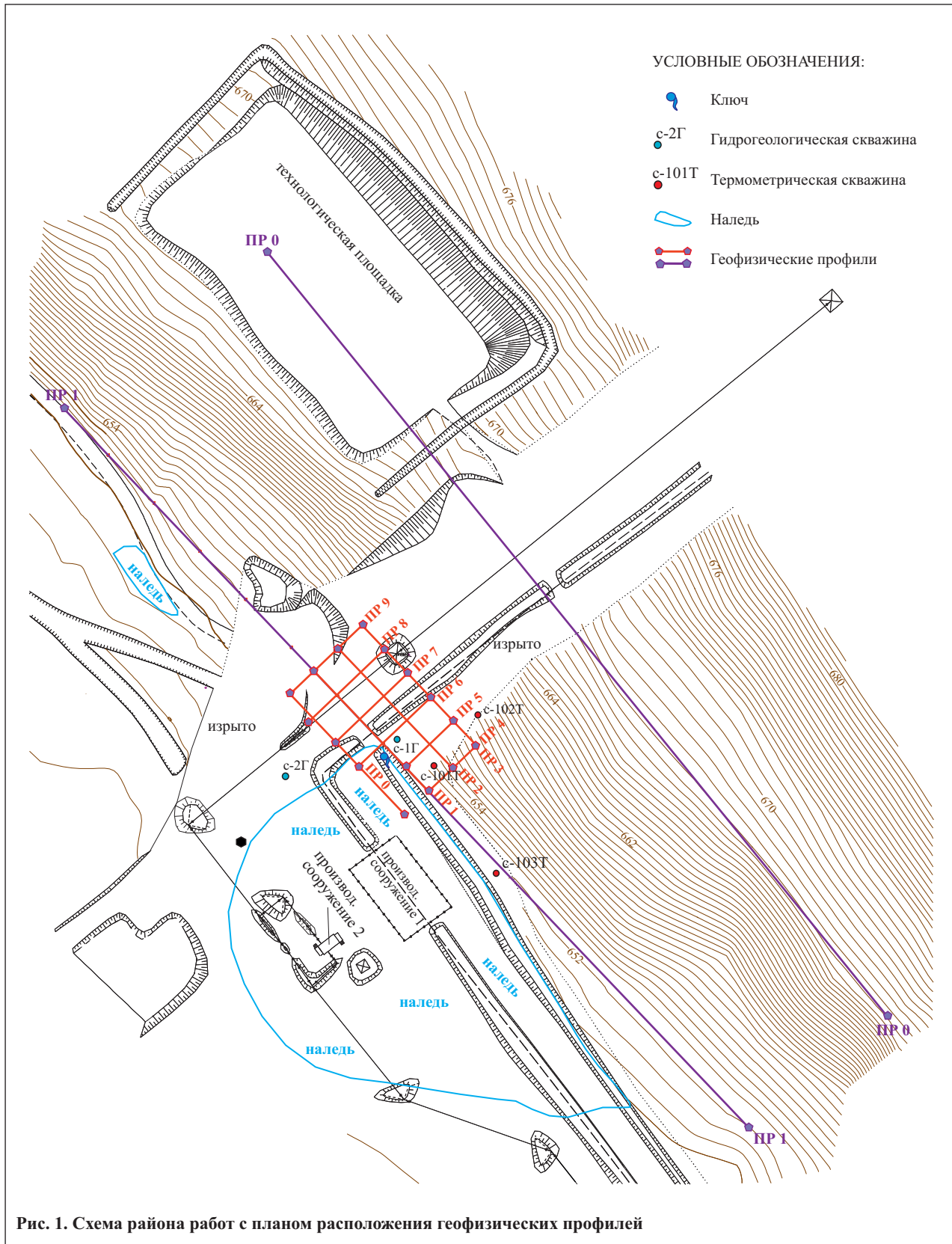
The results of engineering-geological monitoring of the development and formation features of an icing in an oil pipeline system area determine that the main water inflow for its formation takes place through the pipeline trench. The origin of the water is over-permafrost, but subpermafrost inflow into the trench is also possible because of the Chulmakan fault proximity.



возникает напор, под действием которого вода выходит на поверхность, растекается, замерзает и образует наледь. Выход воды на поверхность происходит в местах с толстым моховым покровом или у кустарника, где обычно бывает толстый снежный покров, защищающий грунт от промерзания. В таких местах под слоем снега грунт промерзает мало или в нем могут оставаться окна таликов, через которые грунтовая вода под небольшим напором может выходить на поверхность.

На рисунке 2 схематично отображен механизм образования наледей грунтовых вод за счет нарушения режима грунтового потока вследствие подрезки склона при строительных работах.

Обычно наледи, питаемые грунтовыми водами, развиваются в первой половине зимы. Особенно не продолжительным их развитие бывает, когда верхняя граница многолетней мерзлоты или коренные породы залегают в пределах слоя зимнего промерзания.



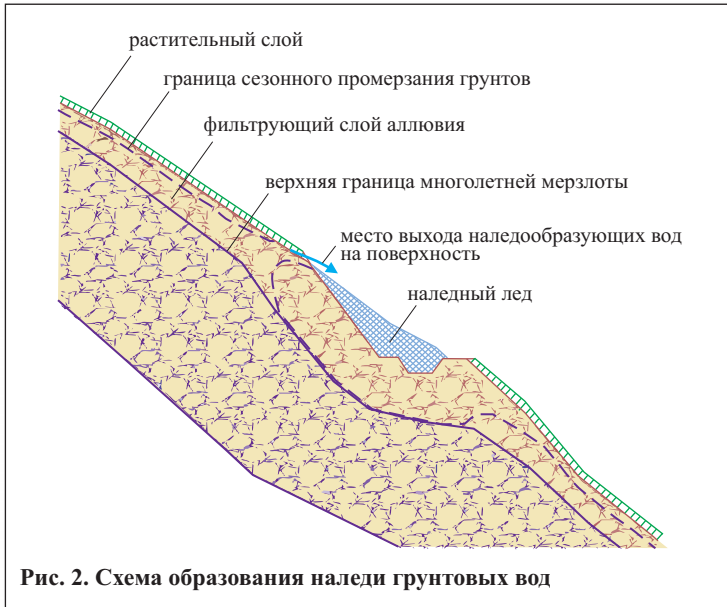


Рис. 2. Схема образования наледи грунтовых вод

При этом слой сезонного промерзания быстро смыкается с водоупором, и дальнейшее развитие наледи прекращается.

Форма грунтовых наледей обычно бывает вытянутой поперек направления стока. Они занимают небольшую площадь, их мощность не превышает 1 м. Питающие их грунтовые воды, выходящие на поверхность, слабо окрашены в цвет грунтов водоносного слоя (желтый, бледно-коричневый или др.). Лед в та-

ких наледях является косослоистым, зернистым, с включениями оледеневших прослоек снега.

Рассмотрим общую характеристику наледей грунтовых вод с водоупором на границе многолетней мерзлоты. На рисунке 3, а приведен разрез по линии II-II, проходящий через термометрические скважины 101Т и 102Т. Инженерно-геологический разрез на этом рисунке совмещен с георадиолокационным по геофизическому профилю 4, проходящему в непосредственной близости от инженерно-геологического профиля (см. рис. 1).

Отметим, что в течение всего периода наблюдений по скважине 102Т отмечались положительные температуры в интервале глубины от 2,5 м до ее забоя (рис. 3, б), уровень грунтовых вод в ней установился на глубине 5,8–6,0 м. При проходке скважины 1Г, находящейся в непосредственной близости от 101Т, грунтовые воды были встречены на глубине 2,7 м, установившийся уровень грунтовых вод составил 1,15 м. По скважине 101Т ежемесячно наблюдался уровень льда на глубине 1,4–1,2 м, что хорошо соотносится с данными по 1Г. Помимо того, начиная с глубины 3,4 м и до забоя скважины 1Г установлено наличие мерзлых пород массивно-слоистой криотекстуры. Таким образом, обводненный интервал от 2,7 до 3,4 м можно с достаточной уверенностью рассматривать как межмерзлотный талик.

Выделенное данным георадиолокации зеркало грунтовых вод (линия синего цвета на рис. 3, а) по уровню полностью совпадает с данными по термометрическим и гидрогеологическим скважинам 101Т,

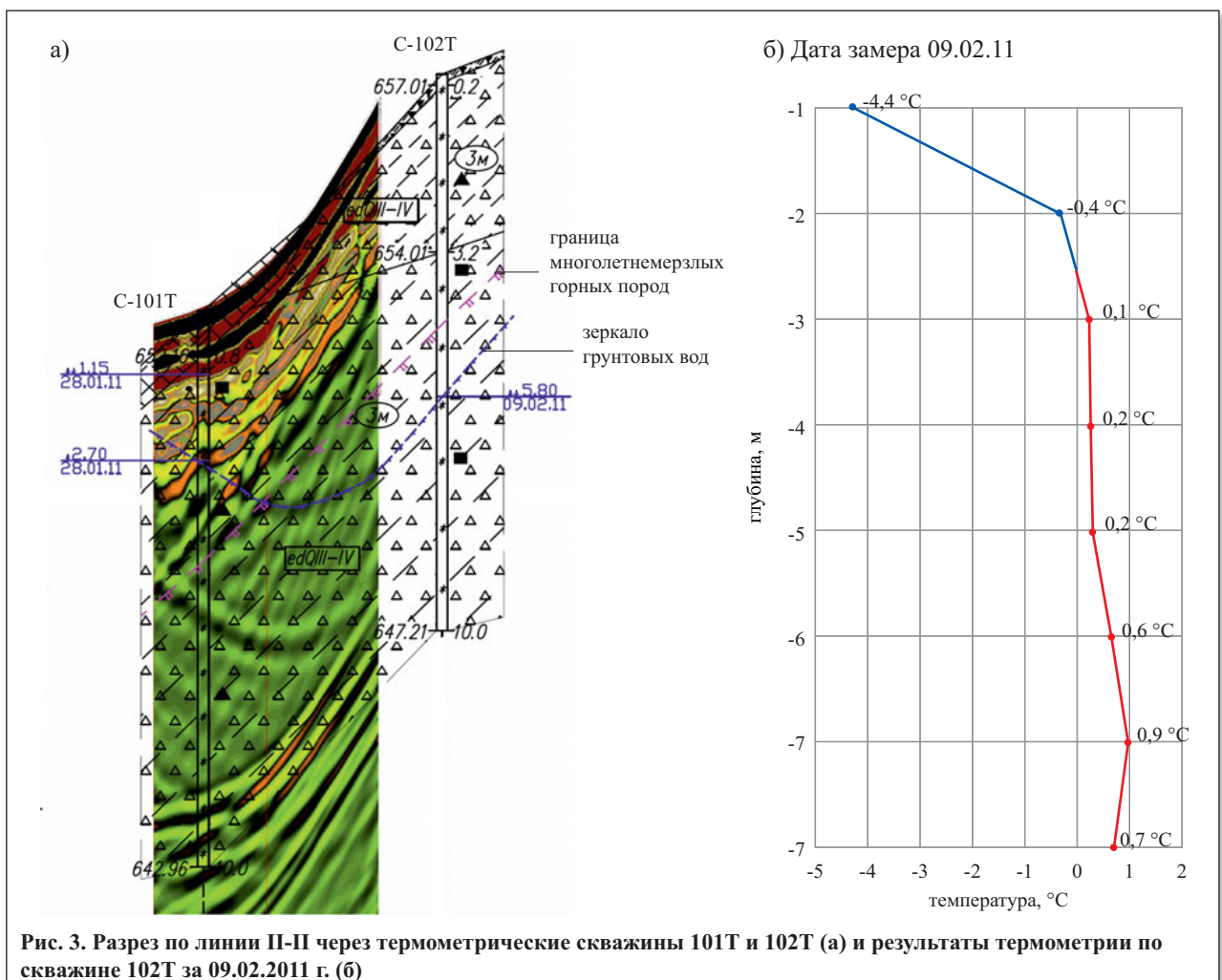


Рис. 3. Разрез по линии II-II через термометрические скважины 101Т и 102Т (а) и результаты термометрии по скважине 102Т за 09.02.2011 г. (б)



Рис. 4. Наледь грунтовых вод и водоотводная канава (январь 2011 г.)

102Т и 1Г. Грунтовые воды на георадиолокационном разрезе выделены исходя из типичного для подобной ситуации вида аномалии: выдержанная непрерывная поверхность (по пунктиру синего цвета на рис. 3) с явно выраженными переотражениями ниже по разрезу. Аналогичного вида аномалии установлены на всех геофизических профилях, проходящих поперек склона.

Склон между скважинами 101Т и 102Т был подрезан при строительных работах. Таким образом, приведенная на рис. 2 модель образования наледи грунтовых вод и ситуация, наблюдаемая по разрезу (см. рис. 3, а), полностью совпадают. Рассматриваемую наледь в соответствии с классификацией С.М. Большакова [1] можно отнести к типу П.4 (наледи грунтовых вод рыхлой толщи), подтипу П.4.2 (с водоупором из многолетнемерзлых грунтов). Она приурочена к участку с нарушенным растительным покровом. Лед наледи зернистый, с включениями оледенелого снега, слабо окрашенный в цвета грунтов, вмещающих водный поток (рис. 4). В подтверждение гипотезы о ее происхождении можно привести фотографию, представленную на рис. 5 (аналогичного вида наледь наблюдается примерно на той же абсолютной отметке на перегибе рельефа ниже технологической площадки, справа от производственного сооружения 1 (см. рис. 1)).

На фотографии, представленной на рис. 6, отчетливо видна разница между льдом наледи грунтовых вод (желтоватым, зернистым, с включениями грунта), наблюдаемой на подрезанном склоне, и льдом наиболее опасной основной наледи (вероятно, смешанных вод), перенесенным из водоотводной канавы.

Для установления генетического типа основной наледи обратимся к данным дипольного электрического зондирования (ДОЗ). На рисунке 7 представлены разрезы кажущегося сопротивления по данным ДОЗ. Первый сверху разрез построен по результатам исследований, выполненных в мае 2010 г. Далее (сверху вниз) — по итогам исследований февраля, марта, апреля и мая



Рис. 5. Наледь в нижней части склона напротив технологической площадки



Рис. 6. Наледный лед различного генезиса (март 2011 г.)

2011 г. [2]. На разрезах зафиксирована область аномально низкого сопротивления грунтов, совпадающая с точкой пересечения профилем нефтепровода (пикетом 165 м геофизического профиля 1). Слева от этой точки наблюдается область низких сопротивлений (выделена красным цветом), обусловленная растеплением грунтов водотоком по водоотводной канаве.

Если рассматривать процесс в динамике, можно установить наличие полного цикла изменения температурного режима грунтов в непосредственной близости от нефтепровода. Максимальное их растепление наблюдается в зимний период. По мере промерзания почвы область растепленных грунтов уменьшается, выходя на минимум к маю (в июне наблюдения не про-

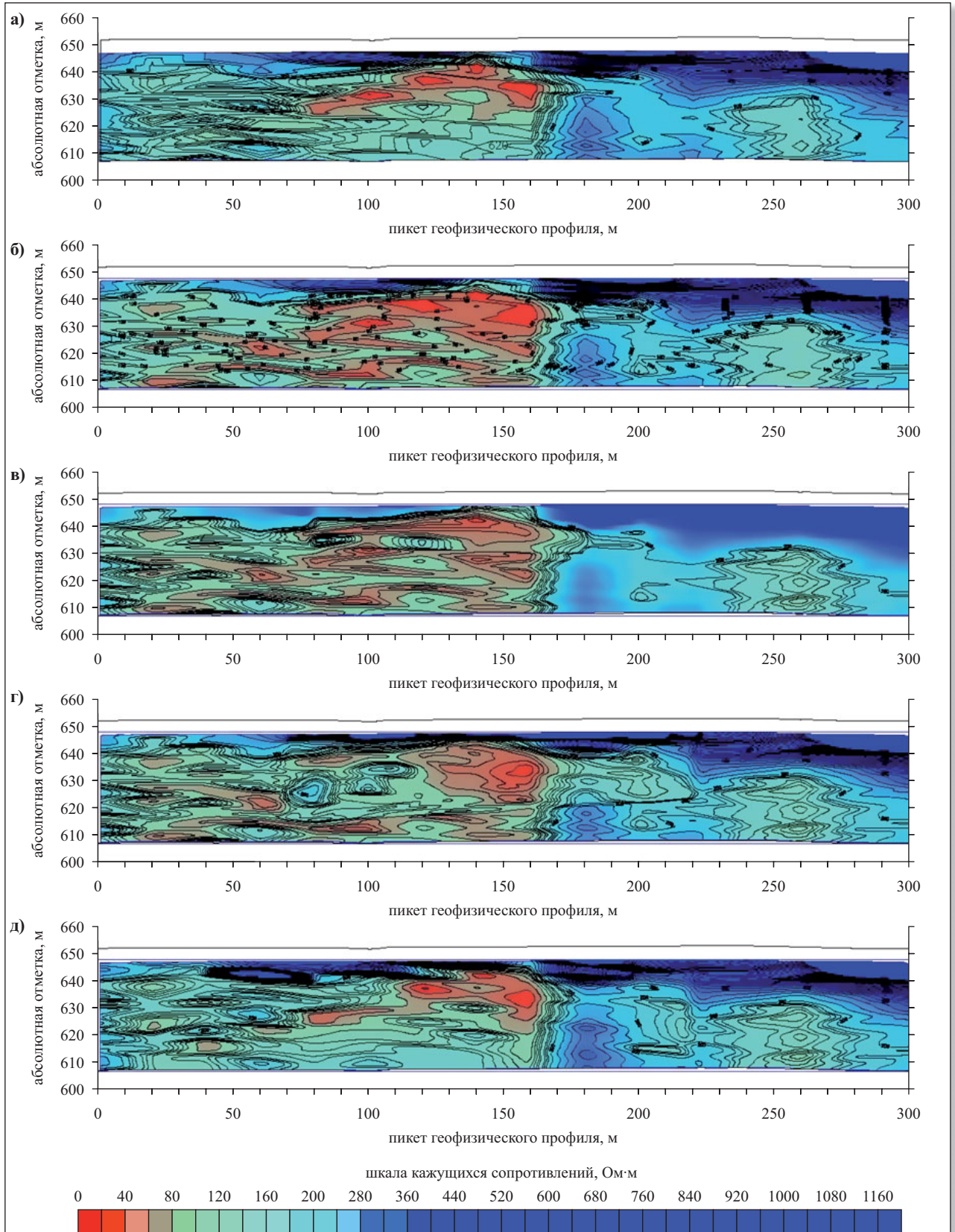


Рис. 7. Разрезы кажущегося сопротивления по данным дипольного осевого зондирования (ДОЗ): а — май 2010 г.; б — февраль 2011 г.; в — март 2011 г.; г — апрель 2011 г.; д — май 2011 г.



Рис. 8. Водоприток по водоотводной канаве 15.01.2011 г. при температуре наружного воздуха минус 40 °С

водились). О полноте цикла можно судить, основываясь на практически полной идентичности геоэлектрической картины на разрезах мая 2010 г. и мая 2011 г.

Хорошо коррелируют с данными ДОЗ результаты натурных наблюдений. Период максимального водопритока по водоотводной канаве приходится на декабрь–январь (рис. 8), к марту наблюдается его полное прекращение. Но при этом поступление вод в технологические колодцы производственных сооружений продолжается. При рассмотрении этого процесса принципиально важными оказались данные наблюдений по гидрогеологической скважине 2Г, пробуренной в непосредственной близости от вершины угла поворота трассы трубопровода к производственному сооружению 1 (см. рис. 1).

При бурении скважины 28 января 2011 г. были пройдены мерзлые грунты от устья скважины до забоя. Наблюдения февраля 2011 г. показали отсутствие поло-

жительных температур по всему стволу скважины (рис. 9, а). В марте 2011 г. наблюдалось уменьшение водопритока в водоотводной канаве и одновременно с этим повышение температур с частичным растеплением грунтов в скважине 2Г (рис. 9, б). В апреле водоприток по канаве прекратился, в до этого сухой скважине 2Г были отмечены установившийся уровень грунтовых вод на глубине 4,9 м и положительные температуры, начиная с той же глубины (рис. 9, в). В мае 2011 г. в скважине 2Г был зафиксирован лед на глубине 0,4 м.

Очевидно, что изменение температурного и гидрогеологического режима по скважине 2Г обусловлено целым комплексом причин. Во-первых, вследствие постоянной механизированной зачистки водоотводной канавы грунты в непосредственной близости от нее были заморожены, что затруднило, а к апрелю 2011 года и окончательно перекрыло приток грунтовых вод в эту

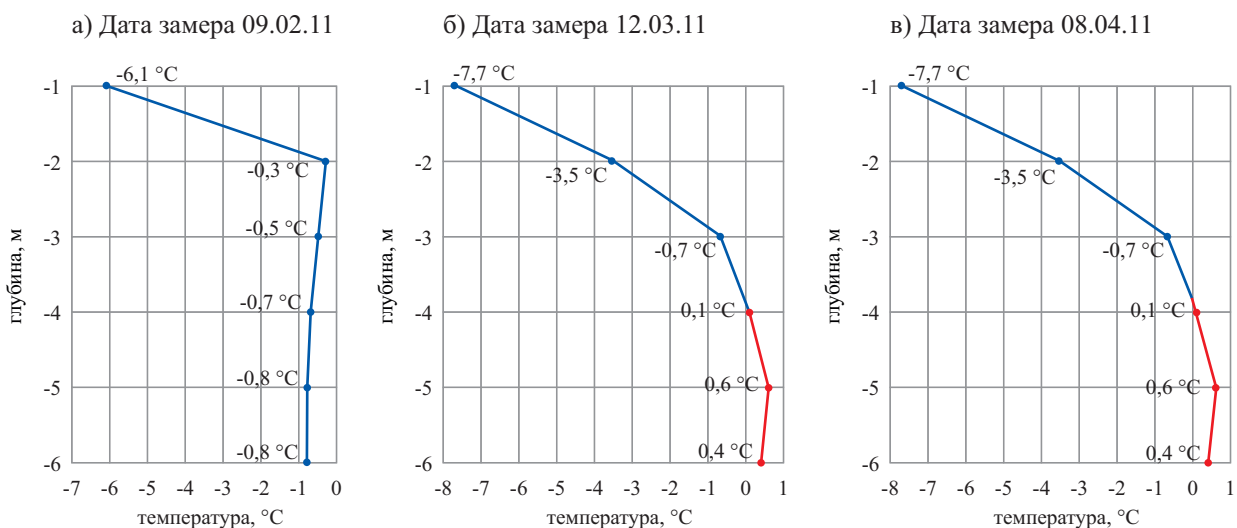
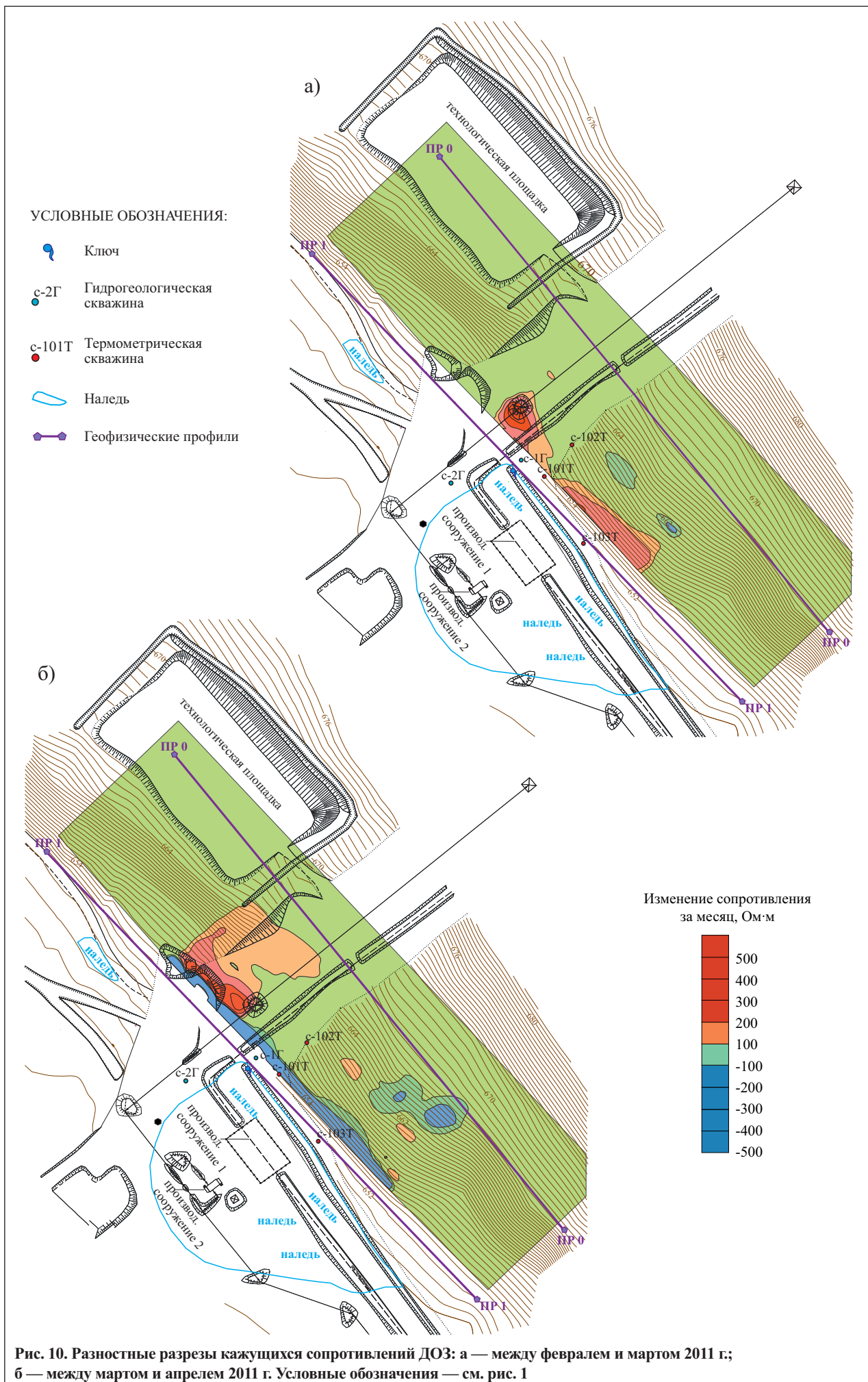


Рис. 9. Термометрия по гидрогеологической скважине 2Г. Синие линии — для отрицательных температур, красные — для положительных



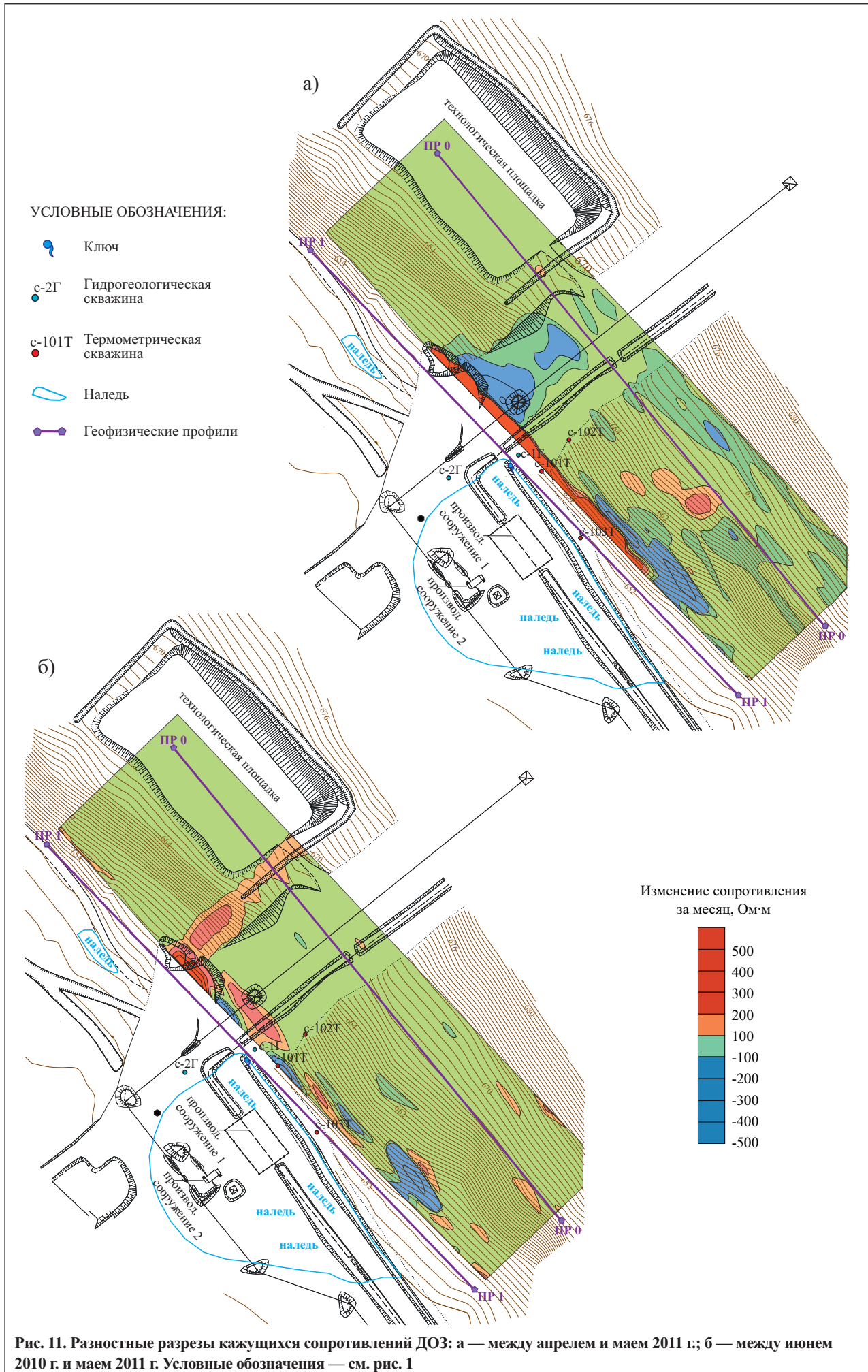


Рис. 11. Разностные разрезы кажущихся сопротивлений ДОЗ: а — между апрелем и маем 2011 г.; б — между июнем 2010 г. и маем 2011 г. Условные обозначения — см. рис. 1

канаву. Во-вторых, увеличение дебита потока по трансшее нефтепровода (как следствие перекрытия потока по водоотводной канаве) растеплило грунты и в направлении траншеи нефтепровода первого варианта прокладки, в непосредственной близости от которой пробурена скважина 2Г.

Исходя из результатов мониторинга, с большой долей вероятности можно предположить, что основной водопристок при образовании наледи на объекте исследований происходит по траншее нефтепровода. Большая площадь водосбора обеспечивает достаточно постоянный дебит потока, несколько уменьшающийся к весенним месяцам. Происхождение вод по большей части является надмерзлотным, но, учитывая близость Чульмаканского разлома, нельзя также исключить поступление в траншею нефтепровода подмерзлотных вод. По типу питания и виду выхода наледи на поверхность ее можно классифицировать как наледь подземных вод (ключевую).

Подводя итог, можно сделать вывод, что по генетическому типу наблюдаемая наледь относится к типу III.6 (наледи смешанных поверхностных и подземных вод) [1]. Сформировавшуюся на участке исследования наледь можно разделить как минимум на два типа:

- тип II.4 — наледь грунтовых вод рыхлой толщи, подтип II.4.2 — с водоупором из многолетнемерзлых грунтов (наледи приурочена к участку с нарушенным растительным покровом, она наименее опасная);
- тип II.5 — наледь подземных вод глубоких горизонтов, подтип II.5.1 — ненапорных вод (она опасная) [1].

Для выяснения термического режима вдоль основного профиля наблюдений был выполнен дополнительный анализ данных электрического зондирования. Суть этого анализа состояла в том, что для лучшей визуализации ежемесячных изменений из разреза ДЗО за каждый месяц вычитался профиль за предыдущий месяц (например, из февральского — мартовский) (см. рис. 7). В результате получились разностные разрезы кажущихся сопротивлений, отражающие увеличение или уменьшение электрического сопротивления за каждый месяц. Они были помещены на топографический план (рис. 10–11). Области синего оттенка на приведенных разрезах обозначают повышение сопротивления (промерозку интервала) за месяц, области красного оттенка — оттайку (понижение сопротивления).

Отраженные на рис. 10–11 изменения полностью согласуются с данными инженерно-геологических наблюдений. Разрез «февраль–март» (рис. 10, а) отражает растепление ВЧР¹ в интервале пикетов 80–180 м по профилю 1. Именно этот интервал на местности проходит по поверхности, затронутой строительными работами, со снятым растительным покровом и отсыпкой. В феврале по водоотводной канаве наблюдался активный водоток, который и обеспечил существенное растепление по разрезу активной части профиля; в скважине 2Г наблюдалось изменение отрицательных температур на положительные, скважина сухая. На разрезе «март–апрель» (рис. 10, б) наблюдается существенное растепление в интервале коридора траншей

нефтепровода и промерозка ВЧР в районе водоотводной канавы и активной (затронутой строительными работами) части профиля. К апрельским наблюдениям водоток по водоотводной канаве прекратился, в скважине 2Г граница растепленной зоны переместилась ниже по скважине, в скважине появилась вода. Для разреза «апрель–май» (рис. 11, а) наблюдается растепление (оттаивание) верхней части активного интервала при относительном понижении температур ниже по разрезу (особенно интенсивные изменения наблюдаются в активном интервале профиля). Водоток по канаве отсутствует, скважина 2Г перемерзла, ледяная пробка начинается практически от поверхности.

Интересен разрез, приведенный на рис. 11, б, отражающий разницу сопротивлений между июнем 2010 г. и маем 2011 г. При практически полном совпадении разрезов наблюдаются две зоны заметного растепления — непосредственно под нефтепроводом и на границе коридора с поверхностью, не затронутой планировочными работами. Конфигурация зоны растепления под нефтепроводом свидетельствует о наличии водотока по его траншее. Подобную геоэлектрическую картину (узкую зону низких сопротивлений, расширяющуюся вниз по разрезу) дает подрусловый талик.

Таким образом, данные представленного в статье исследования подтверждают выдвинутую гипотезу о происхождении наледных вод и генетическом типе рассматриваемой наледи. Учитывая установленный тип наледи, в качестве основных инженерных мероприятий, ориентированных на обеспечение безопасности функционирования изучаемого объекта, можно рассмотреть следующие варианты решения данной проблемы: (1) перенос объектов производственных сооружений вверх по склону; (2) создание комплекса противоналедных мероприятий.

При рассмотрении первого варианта, опираясь на имеющиеся данные о ландшафтно-гидрогеологических условиях района, можно с уверенностью утверждать: перенос производственных сооружений вверх по склону не гарантирует того, что не появятся новые наледи, поскольку при переносе неизбежны планировочные работы, сопряженные со снятием растительного покрова и изменением естественного режима грунтового потока. С этой точки зрения выбор второго варианта, ориентированного на создание комплекса противоналедных мероприятий, выглядит более предпочтительно как с инженерно-геологической, так и с экономической точки зрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.Р. Наледеведение: словарь-справочник. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 438 с.
2. Гриб Н.Н., Сясько А.А., Кузнецов П.Ю., Качаев А.В. Выделение возможных причин наледообразования комплексом геофизических методов в пределах участка перехода трубопроводной системы ВСТО через р. Чульмакан // Проблемы геологии и разведки недр Северо-Востока России: материалы региональной научно-практической конференции, посвященной 55-летию инженерного образования в Республике Саха (Якутия), г. Якутск, 30 марта 2011 г. Якутск: Издательско-полиграфический комплекс СВФУ, 2011. С. 143–146.

¹ ВЧР — грунты верхней части разреза.

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОБНАЖЕНИЙ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ

ON THE PROBLEM OF DETERMINATION OF ROCK STRENGTH PARAMETERS TO ASSESS THE STABILITY OF OUTCROPS

БАБЕЛЛО В.А.

Профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Забайкальского государственного университета, д.т.н., г. Чита, chita-ssv@yandex.ru, babelloviktor@mail.ru

СМОЛИЧ К.С.

Консультант Министерства образования, науки и молодежной политики Забайкальского края, к.т.н., г. Чита, chita-ssv@yandex.ru

BABELLO V.A.

A professor of the hydrogeology and engineering geology department of the Zabaikalsky State University (Trans-Baikal State University), PhD (doctor of science in Technics), Chita, chita-ssv@yandex.ru, babelloviktor@mail.ru

SMOLICH K.S.

A consultant of the Ministry of Education, Science and Youth Policy of the Zabaikalye Territory (Trans-Baikal Krai), PhD (candidate of science in Technics), Chita, chita-ssv@yandex.ru

Ключевые слова:

горные породы; скальные горные породы; массив; показатели прочности; трещиноватость; поверхность ослабления; образцы; лабораторные испытания; призма обрушения; метод обрушения призм.

Key words:

rocks; solid rocks; massif; strength parameters; fracturing; loosening surface; samples; laboratory testing; wedge of failure; failure wedge method.

Аннотация

В статье обсуждаются вопросы оценки параметров прочности скальных пород в лабораторных и натуральных условиях. Показано, что большие трудности возникают при исследовании массивов с разнонаправленной трещиноватостью и поверхностями ослабления. Приведены и сопоставлены результаты опытов по определению характеристик прочности пород на образцах и методом обрушения призм.

Вопросы оценки устойчивости обнажений скальных массивов при строительстве дорожных выемок, котлованов или бортов карьеров остаются на сегодняшний день достаточно актуальными, особенно если массив представлен горными породами, нарушенными большим количеством разнонаправленных трещин и поверхностями ослабления тектонического происхождения.

Примером может служить месторождение сурьмы Хара-Шибирь в Забайкальском крае на границе Могойтуйского и Шилкинского районов, находящееся на стадии разведочных работ. На рисунке 1 представлен западный борт действующего карьера этого месторождения.

В геологическом строении¹ территории месторождения принимают участие стратифицированные образования верхнего отдела триасовой системы. Непосредственно рудовмещающей толщей являются конгломераты и туфоконгломераты нижнекаменской подсвиты. На юге конгломераты имеют четко выраженный тектонический контакт с песчаниками и алевропесчаниками. Северный фланг сложен туфогенно-вулкано-

Abstract

This paper discusses problems of evaluation of rock strength parameters in laboratory and field conditions. It is shown that there are great difficulties in investigations of rock massives having multidirectional fracturing and loosening surfaces. The experimental results on characterization of rock strength using samples and by the failure wedge method are presented and compared.

¹ В данной статье приводится только основная геологическая характеристика горных пород месторождения Хара-Шибирь. Авторы считают нецелесообразным расширять специализированную статью другими подробностями, не имеющими прямого отношения к рассматриваемой теме. Помимо этого авторы, описывая месторождение, не характеризуют способ его разработки и не проводят анализ генезиса трещиноватости и нарушенности рассматриваемого массива, поскольку данное месторождение находится в стадии разведки, а проект карьера только предстоит выполнить. Исследований трещиноватости в ближайшем будущем не предвидится, так как на стадии разведки ее принято определять по керну как блочность (средний размер неразрушенного куска керна). Испытания, которые проводились авторами, проведены в небольшой разрезной траншее, предназначенной для отбора проб для полупромышленных испытаний руд.



Рис. 1. Западный борт карьера месторождения Хара-Шибирь

генными породами верхнекаменской подсвиты с преобладанием дацитов и экструзивных кластолов. Вулканогенно-терригенная формация верхнего триаса представлена андезитами, дацитами, туфолавами среднего состава, туфами кислого состава, туфоконгломерациями, конгломератами и туфоконгломератами с прослоями андезитовых и андезит-базальтовых порфиритов, дацитовых порфиритов, их туфами и туфолавами, а также прослоями реалитовых порфиров. В породах отмечаются зоны развития вторичных кварцитов. Породы формации крепкие², относятся к группе скальных.

Проблема оценки устойчивости бортов действующего карьера месторождения Хара-Шибирь возникла в связи с предстоящей его реконструкцией — углублением и расширением. В связи с этим необходимо было обеспечить получение надежных исходных данных для проведения геомеханических расчетов, в первую очередь параметров физико-механических свойств пород. Анализ фондовых материалов показал, что имеются лишь отдельные разрозненные сведения, касающиеся упомянутых характеристик. При этом параметры прочности пород были получены в лаборатории при одно-

осном сжатии образцов, что было явно недостаточно для оценки устойчивости бортов карьера.

Следует отметить, что в рассматриваемых условиях традиционные лабораторные методы определения прочностных характеристик горных пород, рекомендуемые автором книги [7]³, могут давать завышенные значения. Это связано с тем, что на прочность рассматриваемого массива в первую очередь оказывает влияние

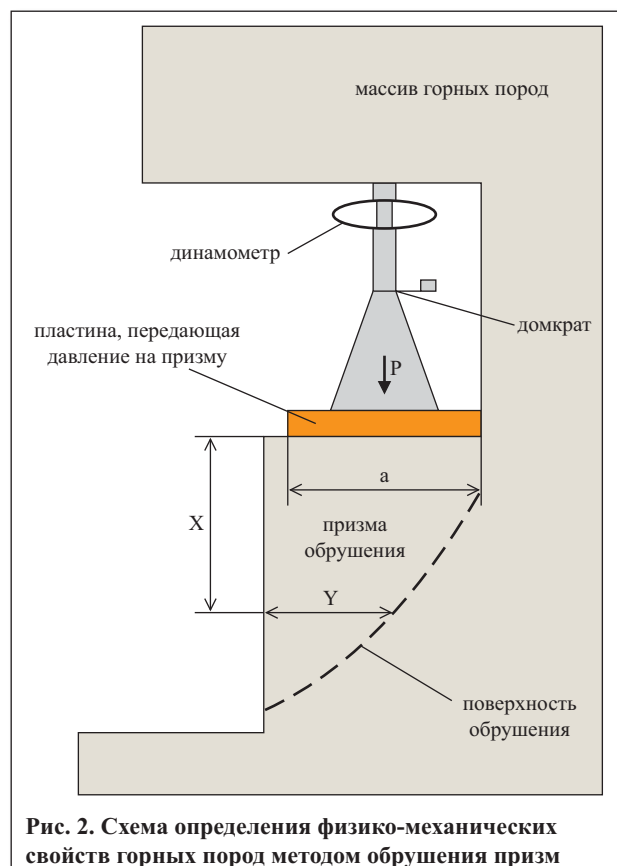


Рис. 2. Схема определения физико-механических свойств горных пород методом обрушения призм

² Так как речь идет о горнорудном предприятии, глубина разработки которого достигает 100 м и более, авторы используют терминологию, принятую в горной промышленности: слово «крепкие» используется в данной статье в связи с принятой методикой определения крепости пород в горной промышленности по шкале Протодьяконова (описываемые горные породы относятся к категориям II и III крепких пород). Кроме того, в инструкции [5] также употребляется термин «крепкие породы».

³ При постановке проблемы авторы статьи опираются на работу, опубликованную более 45 лет назад. Однако, к сожалению, все расчеты по устойчивости откосов, сложенных скальными породами, и на сегодняшний день базируются на классическом методе Фисенко, предложенном в 1967 году [7]. Более современные методы в нашей стране пока не апробированы и не рекомендованы официальными инструкциями ВНИМИ (Научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела).

Таблица

Сравнение результатов испытаний образцов горных пород в лабораторных условиях и методом обрушения призм							
Параметр	Лабораторные испытания (нагрузением образцов сферическими инденторами)			Полевые испытания (методом обрушения призм)			Отклонение
	среднее значение	стандартное отклонение	коэффициент вариации	среднее значение	стандартное отклонение	коэффициент вариации	
Угол внутреннего трения φ , град.	23,16	0,13	0,57	35,90	9,66	24,03	-17,03
Сцепление c , МПа	17,25	13,23	76,72	0,72	0,42	59,20	16,53



Рис. 3. Определение физико-механических свойств горных пород методом обрушения призм в натуральных условиях

ряд факторов: наличие трещин, расстояние между ними, их частота и ориентация, протяженность поверхности ослабления, шероховатость и прочность по контакту, влажность и сцепление заполнителя. В качестве доказательства этого положения авторами настоящей статьи было выполнено сравнение прочностных характеристик рассматриваемых горных пород двумя методами: (1) традиционным методом испытаний образцов горных пород в лаборатории путем их нагружения сферическими инденторами [2] с использованием прибора «Викинг» [3]; (2) методом обрушения призм горных пород в натуральных условиях (рис. 2–4) [1]. Результаты сравнения опытных данных приведены в таблице.

Результаты испытаний образцов горных пород в лабораторных условиях указывают на то, что среднее



Рис. 4. Обрушенная призма со сформировавшейся очень сложной поверхностью обрушения

значение угла внутреннего трения достаточно устойчиво, т.к. коэффициент вариации составил менее 1%. А надежность определения сцепления оставляет желать лучшего, т.к. коэффициент вариации составил 76,72%.

Значительные коэффициенты вариации, полученные при испытаниях методом обрушения призм, объясняются характером неоднородности массива, его значительной раздробленностью, а также сравнительно малым количеством дорогостоящих экспериментов (5 испытаний)⁴. Количество испытываемых образцов в лабораторных условиях составляло несколько десятков на геологический элемент, что позволило снизить общие погрешности определения средних значений показателей, хотя они и были значительными, особенно для сцепления.

При определении механических характеристик горных пород оба метода показали, что наименее точно определяется сцепление, причем по методу обрушения призм были получены низкие его значения (почти в 24 раза меньше по сравнению с величинами, полученными в лабораторных условиях). Это указывает на то, что данный метод в большей степени начинает учитывать раздробленность массива трещинами.

Необходимо отметить, что при определении физико-механических свойств лабораторным методом значение сцепления в массиве горных пород согласно [4–6] принимается для расчетов исправленным, с учетом коэффициента структурного ослабления λ :

$$C_m = \lambda \cdot C_0,$$

где λ — коэффициент структурного ослабления, отн. ед.; C_m — сцепление в массиве горных пород, МПа; C_0 — сцепление по данным лабораторных испытаний, МПа.

⁴ С одной стороны, понятно, что чем испытаний больше, тем характеристика определяется точнее. С другой стороны, есть и экономические критерии, которые не позволяют проводить большое количество дорогостоящих и трудоемких экспериментов, тем более что штамповые испытания для горных предприятий не предполагаются ни одной инструкцией. А согласно теории погрешности измерений для определения значения измеряемого параметра достаточно двух определений (основного и контрольного). Кроме того, в статье приведены количественные характеристики точности измерений в виде стандартных отклонений и говорится о пяти штамповых испытаниях и нескольких десятках лабораторных исследований на геологический элемент. При расчете же устойчивости, для чего, в сущности, и проводились штамповые испытания, согласно методикам ВНИМИ принимаются усредненные показатели характеристик горных пород без детального разделения на геологические элементы в силу интрузивного характера месторождения (когда все горные породы в значительной степени «перемешаны» между собой).



При этом значение λ для крепких горных пород с $\sigma_{сж} = 200 \div 300 \text{ кг/см}^2 = 20 \div 30 \text{ МПа}$ (где $\sigma_{сж}$ — предел прочности на одноосное сжатие) согласно инструкции и указаниям [5, 6] при размере элементарного блока порядка $0,13 \div 0,17 \text{ м}$ примерно составляет $0,02$. Иными словами, значение коэффициента сцепления, определенное при лабораторных испытаниях, уменьшают в 50 раз, а значение угла внутреннего трения предлагается оставить неизменным.

Все это указывает на то, что в настоящее время все еще нет достаточно объективных методов определения характеристик механических свойств горных пород. Даже дорогостоящий метод обрушения призм не может дать полностью объективную информацию. Например, в одном из испытаний авторам не удалось разрушить призму, т.к. домкратом была выдавлена налегающая толща горных пород, что указывает на наличие ослабленных зон в массиве, учет которых в настоящее время достаточно сложен (рис. 5).

Выводы

1. На примере месторождения Хара-Шибирь показана проблематичность определения параметров прочности скальных горных пород в массиве, имеющем поверхности ослабления и системы разнонаправленных трещин.

2. Полевые методы, например обрушения призм в массиве, тоже не позволяют учесть масштабный фактор в полном объеме и могут вносить в рассматриваемых условиях неопределенность в оценку прочности пород. Об этом свидетельствуют деформации налегающего массива, служащего упором для гидродомкрата, установленного на выделенной в массиве призме.

3. Среди причин сложившегося положения следует назвать и недостаточно полное инженерно-геологическое исследование массивов, имеющих тектоническую раздробленность, слоистость и трещиноватость. Особое значение приобретает выявление закономерностей развития сетей крупных трещин в массиве и их направленность, которые, в свою очередь, могут указать на положение ослабленных зон.

4. Такой прочностной параметр, как сцепление, определяется с очень низкой точностью даже с использованием метода обрушения призм, а введение коэффициента структурного ослабления λ , определяемого по среднему размеру элементарного блока массива, является, по существу, «страховочным» коэффициентом. Так как размеры элементарных блоков в массиве имеют тоже значительный разброс, согласно квадратичным правилам сложения погрешностей общая ошибка определения величины сцепления, используемого в окончательных расчетах, еще больше увеличивается.

5. Подводя итог, можно отметить, что на сегодняшний день не существует достаточно объективного метода определения механических свойств скального массива горных пород за исключением, наверное, еще более дорогого метода маркшейдерских наблюдений за реальным искусственным или естественным обрушением горного массива и опре-



Рис. 5. Разрушение налегающего массива при испытаниях методом разрушения призм

деления его механических свойств путем решения обратной задачи. Однако надо понимать, что и этим методом определяются прочностные показатели горного массива только на наблюдаемом участке. ☞

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабелло В.А., Смолич С.В. К вопросу определения характеристик прочности пород методом вертикального обрушения призм // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск «Забайкалье». М.: Мир горной книги, 2007. № ОВ4. С. 331-343.
2. ГОСТ 24941-81. Породы горные. Методы определения механических свойств нагружением сферическими инденторами. М.: Госстандарт СССР, 1982 (по сост. на 18.05.2011 г.). 16 с.
3. Индикатор механических свойств «ВИКИНГ»: руководство по эксплуатации. СПб.: ООО «ЭНЭКО-ПРОМ», 2012.
4. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. СПб.: ВНИМИ, 1998, 208 с.
5. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов, уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Л.: ВНИМИ, 1971. 188 с.
6. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Л.: ВНИМИ, 1972. 165 с.
7. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 378 с.



ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ РЕСПУБЛИКИ КАРАКАЛПАКСТАН

WATER PERMEABILITY OF ALLUVIAL DEPOSITS IN THE NORTH PART OF THE REPUBLIC OF KARAKALPAKSTAN

АИМБЕТОВ И.К.

Заведующий лабораторией геологии Каракалпакского научно-исследовательского института естественных наук, к.т.н., г. Нукус, Узбекистан, izzet_chf@mail.ru

AIMBETOV I.K.

The chief of the Geology Laboratory of the Karakalpakstan Research Institute of Natural Sciences, candidate of science (Technics), Nukus, Uzbekistan, izzet_chf@mail.ru

Ключевые слова:

Каракалпакстан; р. Амударья; водопроницаемость; аллювиальные отложения; поливная вода; засоление; засоленный грунт; карта-схема.

Key words:

Karakalpakstan; Amudarya River; water permeability; alluvial deposits; irrigation water; salinization; saline soil; sketch map.

Аннотация

В статье представлены результаты исследований водопроницаемости аллювиальных отложений северной части Каракалпакстана. Построены карты-схемы фильтрационных свойств засоленных грунтов для глубин 2, 5 и 10 м.

Введение

Республика Каракалпакстан расположена в северо-западной части Республики Узбекистан на площади 165,6 тыс. кв. км (37% территории Узбекистана) и занимает северо-западную часть пустыни Кызылкум, юго-восточную часть плато Устюрт, южную часть Аральского моря и дельту Амударьи. Площадь орошаемой территории Каракалпакстана составляет 500 тыс. га.

Полив сельхозкультур республики осуществляется водами реки Амударьи. В маловодные годы сельское хозяйство Каракалпакстана испытывает острую нехватку в воде. В то же время в сельском хозяйстве наблюдается большая потеря воды на фильтрацию. Например, в каналах, в основном проложенных в земляных руслах, за счет фильтрации теряется около 50% воды, поэтому коэффициент полезного действия оросительных систем в целом очень низок и составляет 0,54–0,56 (эти коэффициенты равны 0,90; 0,84 и 0,71–0,73 для магистральных, межхозяйственных и внутрихозяйственных систем соответственно) [3, 5].

Использование несовершенных способов полива сельхозкультур приводит к непроизводительным потерям воды и инициирует засоление грунтов, в том числе почв.

Одной из экологических особенностей Республики Каракалпакстан является засоленность грунтов растворимыми солями. Причем в последние годы происходит их дополнительное засоление, что нарушает экологическое равновесие в регионе.

Исследования показывают, что 95% орошаемых земель Каракалпакстана засолены. В северной части республики запас солей в почвенном покрове (до глубины 0,3 м от поверхности) колеблется от 5,66 до 777,20 т/га, а в среднем составляет 109 т/га [1]. При этом для данного слоя наиболее засоленными являются территории, подвергающиеся интенсивной ирригации. Для слоя 0–10 м запас солей колеблется от 107,05 до 2466,05 т/га.

Abstract

The article presents research results of water permeability of alluvial deposits in the north part of Karakalpakstan. Sketch maps of the filtration properties of the saline soils for the depths of 2, 5 and 10 meters are constructed.



Интенсивная ирригация северной части Каракалпакстана приводит к поднятию грунтовых вод и росту их агрессивности. В результате увеличения последней происходит разрушение подземных частей зданий и подземных инженерных коммуникаций. Рост засоленности грунтов изменяет их физико-механические свойства, что затрудняет проектно-исследовательские работы.

В связи с вышеизложенным в настоящее время в Каракалпакстане необходимо совершенствовать управление водными ресурсами реки Амударьи, что позволило бы более рационально использовать поливную воду, улучшать мелиоративное состояние орошаемой территории и предотвращать дальнейшее засоление грунтов.

На взгляд автора, инженерно-геологические исследования ирригационной зоны Каракалпакстана являются важнейшей научной составляющей в управлении рекой Амударьей, поскольку использование их результатов для районирования орошаемой территории по водно-физическим свойствам грунтов позволит разработать мероприятия по снижению потерь воды в каналах и по рассолению грунтов, а также более оптимально размещать сельхозкультуры в зависимости от их водопотребления.

В связи с этим целью данной работы является инженерно-геологическая оценка водопроницаемости грунтов ирригационной зоны северной части Каракалпакстана. В рамках поставленной цели решались следующие задачи: (1) провести полевые инженерно-геологические исследования в северной части Каракалпакстана; (2) выполнить лабораторные исследования по определению водопроницаемости грунтов, залегающих на данной территории на глубине 2, 5 и 10 м; (3) определить экспериментальные зависимости водопроницаемости этих грунтов от их физических свойств; (4) построить карты-схемы водопроницаемости грунтов рассматриваемого региона.

Методика исследований

В целях изучения водопроводимости грунтов северной части Каракалпакстана были проведены специальные исследования по определению коэффициента фильтрации грунтов, залегающих на глубине до 10 м. Площадь исследований составила 15 тыс. кв. км. Всего было пробурено 44 скважины до глубины 12 м. Расстояние между ними составляло 15–30 км.

Наиболее широко и повсеместно распространенным в низовьях Амударьи генетическим типом четвертичных отложений являются аллювиальные грунты, образующие древнюю и современную (сформировавшуюся

и формирующуюся) дельты этой реки. Результаты исследований показали, что грунты данной территории (до глубины 10 м) в основном представлены песками, супесями, суглинками и глинами аллювиального происхождения [2].

Из проб с нарушенной структурой формировались образцы для испытаний с плотностью, близкой к природной. В лабораторных условиях были определены значения коэффициента фильтрации для образцов грунтов, залегающих на глубинах 2, 5 и 10 м, с использованием прибора Литвинова. При этом в них создавалось вертикальное напряжение, равное природному давлению.

Поскольку при этом природная структура грунта все же отличалась от нарушенной, полученные в лабораторных опытах значения коэффициента фильтрации можно использовать лишь для сравнительного анализа, а не для прогнозных оценок водопроницаемости изучаемых грунтов. Наибольшие отклонения лабораторных данных по водопроницаемости от аналогичных характеристик грунтов естественного сложения будут отмечаться у суглинков и глин, а наименьшие — у песков.

Результаты исследований

В таблице 1 представлены результаты лабораторных исследований водопроницаемости рассматриваемых грунтов и их физические свойства.

Результаты экспериментальных исследований показали, что водопроницаемость грунта зависит от его вида, литологического состава и физических свойств. Подтверждено, что для глинистых отложений коэффициент фильтрации K_{ϕ} зависит от числа пластичности. В результате статистической обработки результатов экспериментов были получены следующие зависимости K_{ϕ} (см/с) от числа пластичности I_p :

при коэффициенте пористости $0,65 \leq e_0 \leq 0,85$ и числе пластичности $10 \leq I_p \leq 17$

$$K_{\phi} = -1,05 \cdot 10^{-7} + 1,86 \cdot 10^{-6}/I_p; \quad (1)$$

при $0,55 \leq e_0 \leq 0,65$ и $3 \leq I_p \leq 14$

$$K_{\phi} = 9,02 \cdot 10^{-9} + 2,33 \cdot 10^{-7}/I_p; \quad (2)$$

при $0,45 \leq e_0 \leq 0,55$ и $2 \leq I_p \leq 14$

$$K_{\phi} = 3,50 \cdot 10^{-9} + 2,55 \cdot 10^{-7}/I_p. \quad (3)$$

Таблица 1

Минимальные и максимальные значения физических свойств и коэффициента фильтрации грунтов						
Грунт	Свойства после фильтрации				Число пластичности I_p , безразм.	Коэффициент фильтрации K_{ϕ} , см/с
	Плотность ρ , г/см ³	Влажность W , %	Плотность частиц ρ_s , г/см ³	Коэффициент пористости e_0 , безразм.		
Песок	1,85÷2,09	-	2,65÷2,67	0,45÷0,76	-	$4,0 \times 10^{-7} \div 6,5 \times 10^{-4}$
Супесь	1,81÷2,20	15,7÷28,8	2,68÷2,72	0,43÷0,85	1,50÷6,75	$9,0 \times 10^{-9} \div 3,2 \times 10^{-7}$
Суглинок	1,93÷2,23	17,3÷25,9	2,69÷2,73	0,43÷0,73	7,35÷15,2	$6,0 \times 10^{-9} \div 8,5 \times 10^{-8}$
Глина	1,76÷2,01	25,2÷37,9	2,73÷2,74	0,72÷1,06	16,2÷20,21	$2,25 \times 10^{-9} \div 1,8 \times 10^{-8}$

В среднем все результаты экспериментов (в диапазонах изменения коэффициента пористости $0,45 \leq e_0 \leq 0,85$ и числа пластичности $2 \leq I_p \leq 17$) аппроксимируются следующей функцией:

$$K_{\phi} = 8,73 \cdot 10^{-9} + 2,37 \cdot 10^{-7} / I_p \quad (4)$$

Для песчаных грунтов подтверждено, что их водопроницаемость зависит от гранулометрического состава. Коэффициент пористости этих грунтов изменяется от 0,65 до 0,75. При линейной аппроксимации результатов экспериментов получена следующая функция, описывающая зависимость их коэффициента фильтрации от содержания глинистых частиц размером менее 0,1 мм:

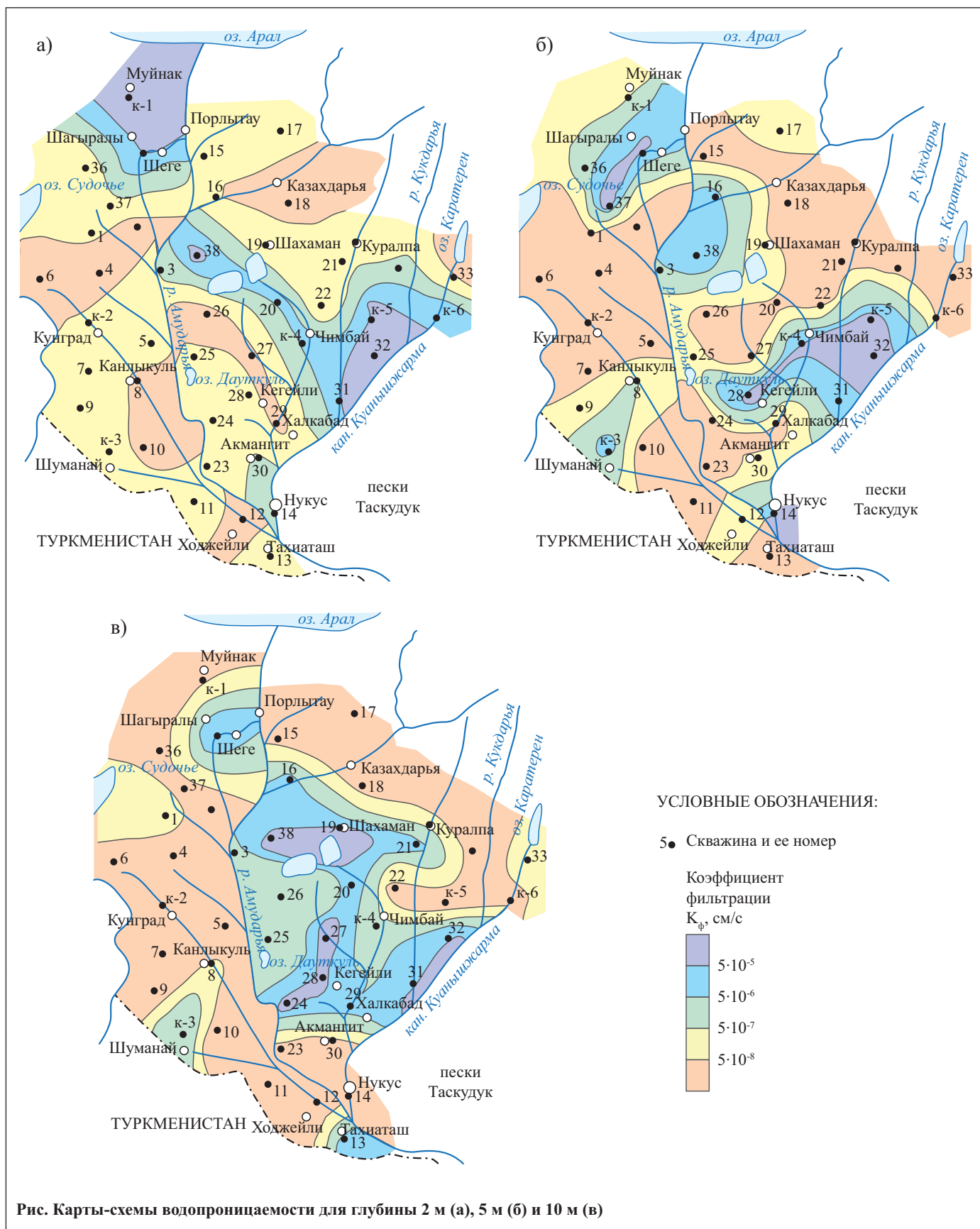


Рис. Карты-схемы водопроницаемости для глубины 2 м (а), 5 м (б) и 10 м (в)



$$K_{\phi} = 2,64 \cdot 10^{-4} - 6,33 \cdot 10^{-6} \cdot G, \quad (5)$$

где G — содержание (%) частиц размером менее 0,1 мм.

При линейной аппроксимации экспериментальных результатов для песчаных грунтов с коэффициентом пористости от 0,45 до 0,55 и содержанием глинистых частиц размером меньше 0,005 мм от 4,5 до 8,5% получена следующая зависимость:

$$K_{\phi} = 10^{-5} - 1,488 \cdot 10^{-7} \cdot G. \quad (6)$$

Зависимости (1)–(6) можно использовать при ориентировочной оценке водопроницаемости грунтов по их физическим свойствам.

По результатам указанных лабораторных экспериментов были построены карты-схемы водопроницаемости отложений, залегающих на глубинах 2, 5 и 10 м от поверхности земли (см. рисунок). Анализ результатов этих исследований показывает, что грунты в рассматриваемом районе обладают различными фильтрационными свойствами, что связано с разнообразием их литологического состава. Например, анализ карты А (см. рисунок) показывает, что наиболее водопроницаемые до глубины 2 м грунты находятся вокруг районных центров Караузьякского и Чимбайского районов и южнее города Муйнака. Самые водонепроницаемые грунты находятся на территориях Ходжейлинского, Канлыкульского, Акмангитского районов, а также в северной части Чимбайского и в восточной части Муйнакского районов (на левобережье р. Амударья). Анализ карт-схем Б и В (см. рисунок) показывает, что с ростом глубины происходит увеличение площади более водопроницаемых грунтов.

В целях сравнительной оценки водопроницаемости слоев грунтов 0–2, 0–5 и 0–10 м была определена средневзвешенная величина коэффициента фильтрации по следующей формуле:

$$K_{\phi, \text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} K_{\phi i} \cdot h_i}{\sum_{i=1}^{i=n} h_i}, \quad (7)$$

где $K_{\phi i}$ — коэффициент фильтрации i -го слоя, м/сут; h_i — толщина i -го слоя, м; n — число слоев.

По формуле (7) были подсчитаны значения коэффициента фильтрации грунтов для всех скважин.

В таблице 2 представлены результаты сравнительного анализа водопроницаемости грунтов правобережья и левобережья р. Амударья. Их анализ показывает, что до глубины 2 м отложения правобережья обладают меньшей водопроницаемостью, чем грунты левобережья. Для глубины же 5 и 10 м наблюдается обратная картина. Это связано с различными периодами осадконакопления. Данное обстоятельство необходимо учитывать при проектировании и реконструкции ирригационных каналов, управлении водными ресурсами и выборе вида сельскохозяйственных культур. Это позволит более рационально использовать водные ресурсы территории.

Грунты значительной части территории левобережья р. Амударья обладают относительно низкой водопроницаемостью, исключение составляет окрест-

Среднеарифметические значения средневзвешенных коэффициентов фильтрации грунтов $K_{\phi} \times 10^{-2}$ м/сут

Место исследования	Кол-во скважин	До глубины, м		
		2	5	10
Левобережье р. Амударья	19	2,82	1,54	1,42
Правобережье р. Амударья	25	0,65	2,20	3,86
По всем 44 скважинам		1,59	1,92	2,81

ность районного центра Шуманай, а также поселка Шеге Муйнакского района.

Рассмотренные особенности водопроницаемости грунтов северной части Каракалпакстана связаны с различиями в инженерно-геологическом строении и периодах накопления отложений, что необходимо учитывать при использовании водных ресурсов р. Амударья.

Выводы

Результаты инженерно-геологических исследований грунтов, залегающих до глубины 10 м на территории дельты р. Амударья, показали следующее.

1. Водопроницаемость грунтов изменяется по глубине и зависит от вида и физических характеристик отложений.
2. Грунты левобережья р. Амударья обладают меньшей водопроницаемостью, чем отложения правобережья.
3. Особенности инженерно-геологических условий дельты р. Амударья необходимо учитывать при проектировании, реконструкции ирригационных каналов, управлении водными ресурсами и выборе вида сельскохозяйственных культур. Это позволит более рационально использовать водные ресурсы данной территории. 📌

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аимбетов И.К., Сейтниязов Ш. Инженерно-геологическая оценка засоления левобережья Амударья северной части Каракалпакстана // Вестник Каракалпакского отделения АН РУз. 1993. № 1. С. 15–18.
2. Аимбетов И.К. Прогноз антропогенных составляющих засоления почвогрунтов Каракалпакстана // Вестник Каракалпакского отделения АН РУз. 1998. № 7. С. 15–18.
3. Байманов К., Камалов Т.К. Потери воды в каналах и их учет. Нукус, 1994. 160 с.
4. Богомолов Г.В. Гидрогеология с основами инженерной геологии. М.: Высшая школа, 1975. 318 с.
5. Кошекков Р.М. Современное состояние использования водных ресурсов в Республике Каракалпакстан // Вестник ККОАНРУз. 1999. № 1. С. 2–4.
6. Саманов Ж., Курбаниязов К., Палыбеков А., Ибрагимов Д. Геология и полезные ископаемые Каракалпаккии. Ташкент: Изд-во АН Узбекистана, 1972. 107 с.
7. Султанходжаев А.Н. Гидрогеологические и инженерно-геологические условия Узбекистана. Ташкент: Изд-во АН Узбекистана, 1964. Т. 2. 234 с.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК КОМПЛЕКСНЫХ НИТРАТНЫХ СОЛЕЙ НА СВОЙСТВА ОБЩЕСТРОИТЕЛЬНОГО И ТАМПОНАЖНОГО ЦЕМЕНТА

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF COMPLEX NITRATE SALT ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF STANDARD AND PACKING CEMENTS

НЕВЕРОВ А.Л.

Доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин (БНГС) Института нефти и газа (ИНИГ) Сибирского федерального университета (СФУ), к.т.н., г. Красноярск, neveroff_man@mail.ru, neveroff_men@mail.ru

ВЕРТОПРАХОВА Л.А.

Заведующая отделом технологии цемента ООО «НТЦ «СибНИИЦемент»», sibniicement@mail.ru

СОЛОВЬЕВА И.А.

Главный специалист отдела технологии цемента ООО «НТЦ «СибНИИЦемент»», solir-67@mail.ru

БАТАЛИНА Л.С.

Доцент кафедры химии и технологии природных энергоносителей и углеродных материалов ИНИГ СФУ, к.х.н., г. Красноярск

МИНЕЕВ А.В.

Заведующий кафедрой БНГС ИНИГ СФУ, д.т.н., профессор, г. Красноярск, mineev_bngs.krsk@mail.ru

NEVEROV A.L.

An associate professor of the department of oil-and-gas well drilling of the Oil-and-Gas Institute of Siberian Federal University, candidate of technical sciences, Krasnoyarsk, neveroff_man@mail.ru, neveroff_men@mail.ru

VERTOPRAHOVA L.A.

The head of the Cement Technology Division of the «SibNIITsement» Scientific and Technical Centre Ltd., Krasnoyarsk, sibniicement@mail.ru

SOLOVYEVA I.A.

The main specialist of the Cement Technology Division of the «SibNIITsement» Scientific and Technical Centre Ltd., Krasnoyarsk, solir-67@mail.ru

BATALINA L.S.

An associate professor of the department of chemistry and technology of natural energy carriers and carbonic materials of the Oil-and-Gas Institute of Siberian Federal University, candidate of science (Chemistry), Krasnoyarsk

MINEEV A.V.

The head of the oil-and-gas well drilling department of the Oil-and-Gas Institute of Siberian Federal University, doctor of technical sciences, professor, Krasnoyarsk mineev_bngs.krsk@mail.ru

Ключевые слова:

комплексные нитратные соли; цемент; цементный раствор; реологические свойства; срок схватывания, прочностные показатели.

Key words:

complex nitrate salts; cement; cement slurry; rheological behavior; setting up time; strength properties.

Аннотация

Статья посвящена исследованию влияния добавок комплексных нитратных солей (полученных при совместной переработке некондиционных азотнокислотных окислителей и нефелинового шлама — отхода глиноземного производства) на свойства общестроительного и тампонажного цемента. Приводятся результаты экспериментальных исследований реологических свойств, сроков схватывания, равномерности изменения объема и прочностных показателей указанных видов цемента без и в присутствии подобных добавок (НКШ-1, ТНК-1).

Введение

Цементное производство, стройиндустрия, техническая мелиорация грунтов и добывающая промышленность достаточно массово используют отходы различных отраслей производства (шлаки, шламы, пыли, отсеивы, полупродукты и многое другое), которые могут не только выступать в роли инертных материалов, но и регулировать свойства цементных растворов и бетонов на стадиях их приготовления, хранения и транспортировки, а также определенным образом влиять на строительные-технические или тампонажно-технические свойства цементного камня или цементного бетона [1].

Технология струйной цементации грунтов в настоящее время является наиболее прогрессивным методом создания противодиффузионных завес. Инженерная идея, которая появилась одновременно в трех странах (Японии, Италии, Англии), оказалась настолько плодотворной, что в течение последнего десятилетия эта технология мгновенно распространилась по всему миру, позволяя не только более эффективно решать традиционные задачи, но и находить новые решения иных многочисленных сложных проблем в области технической мелиорации грунтов. Сущность данной технологии заключается в использовании энергии высоконапорной струи цементного раствора для разрушения и одновременного перемешивания грунта с цемент-

Abstract

The article is devoted to investigation of influence of complex nitrate salt additives (that were got by combined processing of unconditioned nitric-acid oxidizers and nepheline slime — an alumina industry waste) on the properties of standard and packing cements. The authors presents results of experimental investigations of rheological behavior, setting up time, soundness and strength properties of these cements without and with such sort of additives (NKSh-1, TNK-1).



ным раствором в режиме «mix-in-place» («перемешивание на месте»). После затвердевания раствора образуется новый материал — грунтцемент, обладающий высокими прочностными и деформационными характеристиками. По сравнению с традиционными технологиями инъекционного закрепления струйная цементация позволяет укреплять практически весь диапазон грунтов — от гравийных отложений до мелкодисперсных глин и илов. Другим важным преимуществом технологии является чрезвычайно высокая предсказуемость результатов укрепления грунтов. Это дает возможность уже на этапе проектирования и заключения подрядных договоров достаточно точно рассчитать геометрические и прочностные характеристики создаваемой подземной конструкции [13].

Цементирование обработанных горных выработок, нефтяных, газовых или других скважин, техническая мелиорация грунтов, выполнение бетонных работ или производство строительных конструкций ведутся в самом широком спектре климатических условий. При этом широко используются регуляторы реологических свойств, противоморозные добавки и ускорители твердения [2, 12].

Наиболее широко в качестве противоморозной добавки, ускоряющей схватывание цемента и бетона, применяется хлорид кальция. Однако в определенных условиях его использование является ограниченным из-за опасности ускорения коррозии арматуры в железобетонных изделиях, закладных деталей в строительных конструкциях или обсадных колонн и крепей, используемых в добывающей промышленности, а также из-за снижения стойкости цемента к сульфатной агрессии. Еще одно отрицательное влияние добавки CaCl_2 заключается в том, что она увеличивает усадку цемента при затвердевании примерно на 10% и, возможно, также увеличивает его ползучесть.

Хорошей альтернативой хлориду кальция может служить нитрат кальция, который не содержит ионов хлора, разрушающих пассивирующую пленку на поверхности стали, и в связи с этим не вызывает коррозии. Пассивирующее действие нитрата кальция сравнимо с влиянием известного ингибитора коррозии — нитрита кальция. Механизмы действия нитрата и нитрита как ингибиторов коррозии схожи в щелочных средах, таких как бетон. Кинетика действия первого медленнее, чем второго, но это важно только при краткосрочных испытаниях, поскольку на практике коррозия — это довольно длительный процесс. Нитрат кальция обеспечивает большой резервный запас, чем нитрит. Помимо этого бетоны с добавкой нитрата не дают высолов при капиллярном подсосе, периодическом увлажнении и высушивании, отличаются повышенной водонепроницаемостью и пониженной способностью к усадке [11, 14].

Нитрат кальция разрешен к применению в качестве модифицирующей добавки в бетоны и строительные растворы при возведении монолитных бетонных и железобетонных конструкций, монолитных частей сборно-монолитных конструкций, при замоноличивании стыков сборных конструкций, изготовлении ячеистых бетонов и др.

На современном рынке модификаторов бетона нитрат кальция представлен рядом изготовителей. Напри-

мер, ОАО «Буйский химический завод» выпускает его в соответствии с ТУ 2181-039-32496445-2004. Норвежский концерн YARA INDUSTRIAL выпускает продукт NITCAL.

Целью данной работы является исследование влияния на физико-механические показатели общестроительного и тампонажного цемента комплексных нитратных солей, полученных при совместной переработке некондиционных азотнокислотных окислителей и нефелинового шлама (отхода глиноземного производства) и представленных в виде двух продуктов — НКШ-1 и ТНК-1.

Исследования проводили на базе комплекса лабораторного и испытательного оборудования аккредитованного испытательного центра НТЦ «СибНИИЦемент» (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21CA12) с использованием стандартных методов, таких как определение химического состава материалов, физико-механических показателей общестроительного цемента и тампонажного цемента. Кроме этого, при выполнении работы руководствовались нормативными документами [3–10, 15].

Химический состав исходных материалов

Исследования по разработке технологии получения нитрата кальция выполнялись в лаборатории Института химии и химической технологии (ИХХТ) СО РАН (г. Красноярск) с использованием окислителей «Меланж АК-27И» и «АТ». Первый продукт — смесь концентрированной азотной кислоты и окислов азота с добавлением ингибитора коррозии йода. Это темно-вишневая жидкость, выделяющая на воздухе окислы азота, с температурой кипения плюс 44–49°C, температурой замерзания минус 52–61°C, плотностью 1,600 г/см³ при 20°C. Второй продукт представляет собой смесь N_2O_4 и NO_2 . Это жидкость красно-бурого цвета с температурой кипения плюс 21,3°C. Данные продукты поставлялись в емкостях из нержавеющей стали объемом до 800 мл.

Нитрат кальция получали выщелачиванием нефелинового шлама указанными кислотами. Состав исходного шлама был следующим (по результатам рентгенофлуоресцентного анализа):

Элемент	Содержание, %
O	34,40
F	1,90
Na	0,33
Mg	0,33
Al	2,20
Si	10,30
P	0,10
K	1,10
Ca	44,00
Ti	0,27
Mn	0,11
Fe	3,70
Sr	0,18
Ba	0,05

Влажность шлама составляет 11% (после сушки при 120°C), содержание в нем оксида кальция —


Рис. 1. Внешний вид НКШ-1

61,5%, оксида кремния — 21%. Содержание в шламе примесей (Na, Mg, K, Mn, Sr, Ba), которые достаточно легко могут выщелачиваться азотной кислотой, значительно ниже, чем кальция. Их содержание составляет около 2%.

Для исследований специалистами ИХХТ СО РАН авторам были предоставлены два продукта: НКШ-1 — тонкая смесь нитрата кальция и хвостов нефелинового (белитового) шлама; ТНК-1 — твердый нитрат кальция.

НКШ-1 представляет собой сыпучий гигроскопичный материал светло-коричневого цвета (рис. 1) с содержанием водорастворимой части 40–43%. По данным ИХХТ СО РАН, состав НКШ-1 по основным компонентам является следующим: 57–60% — хвосты шлама; 40–43% — нитрат кальция. Химический состав хвостов шлама, содержащихся в этом продукте:

Вещество	Содержание, вес. %
SiO ₂	60,00
Al ₂ O ₃	7,50
Fe ₂ O ₃	11,70
CaO	14,00
MgO	0,65
SO ₂	0,12
Na ₂ O	0,50
K ₂ O	1,10


Рис. 2. Внешний вид ТНК-1

Показатель pH 50%-ной водной суспензии НКШ-1 был изначально равен 3, что для использования в щелочной среде цементных растворов нежелательно. В связи с этим реакцию среды подкорректировали гидроксидом натрия до pH-нейтральной.

ТНК-1 представляет собой полупрозрачный стекловидный, хорошо растворяющийся в воде продукт бежево-коричневого цвета (рис. 2). По данным ИХХТ СО РАН, компонентный состав этого продукта является следующим: 83–87% — нитрат кальция; не более 6% — нитраты магния, натрия, алюминия и железа; остальное — гидратная вода. pH 50%-ного раствора ТНК-1 равен 4, что так же, как и в случае с раствором НКШ-1, неблагоприятно для использования совместно с цементом, поэтому требуется корректировка pH.

В качестве контрольной добавки при экспериментальных исследованиях использовался безводный чистый хлорид кальция.

При испытаниях указанных продуктов в качестве вяжущей основы использовали бездобавочный цемент типа ЦЕМ I класса прочности 42,5 и цемент с минеральными добавками типа ЦЕМ II класса прочности 32,5, серийно выпускаемые ООО «Красноярский цемент» по ГОСТ 31108. Химический состав этих цементов представлен в табл. 1, из которой видно, что они типичны по своему химико-минералогическому составу. Цемент ЦЕМ I 42,5 не содержит минеральных добавок, кроме гипса. В цементе ЦЕМ II 32,5 содержание минеральной добавки (доменного гранулированного шлака) соответствует нормативному (не более 20%).

Таблица 1

Химический состав цементов																				
Вид цемента	Массовая доля оксидов, %										В т.ч., %			Модульный состав портландцементного клинкера****			Расчетный минералогический состав клинкера, %			
	ппп**	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	R ₂ O***	CaO _{св}	Нераств. остаток	КН	n	p	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Цемент без добавок (ЦЕМ I 42,5)	1,70	20,27	5,21	4,20	63,17	2,02	2,81	0,29	0,55	0,30	0,65	0,60	0,15	0,90	2,15	1,24	54	17	6,7	13
Цемент с минеральными добавками* (ЦЕМ II 32,5)	1,92	22,08	6,53	3,55	58,55	3,42	3,05	0,32	0,58	0,50	0,70	0,50	-	-	-	-	-	-	-	-

* Содержание минеральной добавки в цементе ЦЕМ II 32,5 — 19,5%.
 ** ппп — потери при прокаливании.
 *** Для R₂O данные приводятся в пересчете на Na₂O (0,658·K₂O+Na₂O).
 **** КН — коэффициент насыщения кремнезема известью; n — силикатный модуль; p — глиноземный модуль.



Таблица 2

Результаты физико-химических испытаний по стандартам для общестроительного цемента				
Наименование добавки к вяжущей основе*	Ввод добавки в цемент, %	Водоцементное отношение цементно-песчаного раствора 1:3	Растекаемость цементно-песчаного раствора 1:3, мм	Нормальная густота цементного теста, %
Без добавки (контрольная проба)	0	0,38	115,0	25,00
CaCl ₂	0,5	0,38	115,0	25,00
	1,0	0,37	115,0	25,50
	2,0	0,37	114,0	26,00
НКШ-1	Ca(NO ₃) ₂ 0,5	0,38	113,5	26,00
	Ca(NO ₃) ₂ 1,0	0,38	113,5	27,00
	Ca(NO ₃) ₂ 2,0	0,38	113,0	30,00
ТНК-1	Ca(NO ₃) ₂ 0,5	0,38	115,0	25,00
	Ca(NO ₃) ₂ 1,0	0,38	114,0	25,50
	Ca(NO ₃) ₂ 2,0	0,38	113,5	25,75

* В качестве вяжущей основы использован общестроительный цемент с минеральными добавками.

Исследование влияния добавок НКШ-1 и ТНК-1 на реологические свойства цементных растворов

Физико-механическим испытаниям по ГОСТ 310.1-4 и ГОСТ 30744 (стандартам для испытаний общестроительных цементов) подвергли более массовый вид цемента — с минеральными добавками. В качестве тампонажных для низких, нормальных и умеренных температур по ГОСТ 26798.1 испытывали оба вида цемента — и бездобавочный, и с минеральными добавками. В связи с тем что обе эти вяжущие основы выпускаются по ГОСТ для общестроительного цемента и не являются тампонажными, при оценке экспериментальных результатов оценивали не абсолютные значения полученных характеристик, а влияние добавок на свойства образцов по сравнению с контрольным.

Из-за большой продолжительности экспериментов вместо определения времени загустевания для низких и нормальных температур измеряли консистенцию затвердевающего цементного раствора через 90 минут работы консистометра при 22°C. В принципе для этого времени вполне достаточно, т.к. по нормативным требованиям к тампонажным цементам типа ПЦТ I и ПЦТ II время загустевания раствора до консистенции 30 Вс должно быть не менее 90 минут. НКШ-1, ТНК-1 и CaCl₂ в цемент добавляли в виде водных растворов, концентрация Ca(NO₃)₂ и CaCl₂ составляла 0,5; 1,0 и 2,0%.

Влияние добавок на реологические свойства и сроки схватывания общестроительных цементов оценивали по нормальной густоте цементного теста, водоцементному отношению, растекаемости цементно-песчаного раствора (расплыву стандартного конуса), а для тампонажных цементов типов I и II для низких, нормальных и умеренных температур — по растекаемости цементного раствора при фиксированном водоцементном отношении 0,5 [12]. Результаты испытаний приведены в табл. 2, 3.

Анализ результатов, представленных в табл. 2, показал, что пластичность цементно-песчаного раствора в присутствии добавок, содержащих Ca(NO₃)₂, практически не изменяется. Водоцементное отношение остается неизменным — 0,38, растекаемость снижа-

ется максимум на 2 мм (со 115 мм до 113 мм). В присутствии НКШ-1, содержащего хвосты белитового шлама, абсолютная величина растекаемости самая низкая — 113–113,5 мм. Более очищенный продукт — ТНК-1 — действует на растекаемость слабее. Ввод CaCl₂ на стадии приготовления раствора способствует росту его пластичности. Степень разжижения раствора зависит от концентрации CaCl₂, максимальный эффект наблюдается при вводе 1% CaCl₂: в этом случае при водоцементном отношении 0,37 растекаемость раствора достигает 115 мм.

Нормальная густота цементного теста как в случае ввода CaCl₂, так и при использовании добавок НКШ-1 и ТНК-1, содержащих нитрат кальция, возрастает пропорционально их дозировке. Наибольшей величиной нормальной густоты цементного теста (что не является положительным фактором) характеризуются цементы в присутствии добавки НКШ-1. Вероятно, на водопробность цемента в этих случаях влияют высококремнеземистые хвосты шлама, содержащиеся в НКШ-1. В случае с ТНК-1 рост нормальной густоты теста менее значителен. При дозировке ТНК-1, равной 0,5–1,0%, величина нормальной густоты теста одинакова по сравнению с образцами, содержащими такое же количество CaCl₂, а при более высокой дозировке (2%) этот показатель даже несколько ниже — 25,75% против 26,00%.

На подвижность, стабильность и консистенцию тампонажного цементного раствора с водоцементным отношением 0,5 (см. табл. 3) присутствие химических добавок также оказывает довольно заметное влияние, особенно в случае с растворами на основе портландцемента без минеральных добавок.

Увеличение растекаемости раствора на бездобавочном портландцементе наблюдается как в присутствии CaCl₂, так и при добавлении ТНК-1, причем ввод ТНК-1 от 0,5 до 2% действует более стабильно, чем CaCl₂, который при дозировке 2% от массы цемента начинает загущать раствор. Ввод НКШ-1 способствует загущению раствора даже при самых малых концентрациях, растекаемость снижается пропорционально росту дозировки. Что касается растворов на основе портландцемента с минеральной добавкой, то на его растекае-

мость ввод 1% каждого из изучаемых реагентов практически не оказал никакого влияния.

Отмечено положительное влияние добавок на повышение седиментационной устойчивости тампонажных растворов как на основе портландцемента без минеральных добавок, так и на основе цемента с добавкой доменного шлака. Снижение водоотделения усиливается с ростом дозировки добавки. Наиболее эффективными оказались продукты, содержащие $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, — ТНК-1 и НКШ-1. При этом необходимо отметить, что в присутствии НКШ-1 раствор практически сразу же потерял подвижность. Вероятно, это связано с наличием в составе НКШ-1 активных высококремнеземистых хвостов белитового шлака, имеющих большое сродство к цементу (клинкерным минералам). Начальная консистенция раствора на основе портландцемента без минеральных добавок в присутствии НКШ-1 возрастает на 1–2 единицы вязкости в отличие от добавки CaCl_2 , которая при вводе 0,5% незначительно снижает вязкость, а при увеличении дозировки до 1–2% не влияет на нее. Добавка ТНК-1 на консистенцию свежеприготовленного тампонажного раствора не влияет. При вводе ТНК из расчета 0,5–2,0% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ первоначальная консистенция равна 6 Вс, так же как и у контрольного раствора. Через 90 минут работы консистометра при температуре 22°C во всех случаях наблюдается рост вязкости, но в случае с НКШ-1 нарастание величины консистенции самое значительное — в зависимости от дозировки добавки консистенция составляет от 14 до 28 Вс. Вязкость тампонажного раствора на основе портландцемента с минеральными добавками нарастает менее интенсивно.

Необходимо отметить, что в течение 90 минут работы консистометра наблюдается небольшой саморазогрев цементных растворов с химическими добавками. При вводе НКШ-1 и ТНК-1 температура раствора

на 1–2°C выше, чем для раствора с добавкой CaCl_2 , что может представлять интерес при использовании изучаемых продуктов в качестве противоморозных добавок при зимнем бетонировании.

При испытаниях по режиму для умеренных температур (75°C) время загустевания раствора на основе цемента без минеральных добавок в присутствии малых дозировок реагентов не меняется. С ростом концентрации химических добавок время загустевания сокращается на 2–13 минут в зависимости от вида добавки. Максимальное сокращение времени загустевания наблюдается в присутствии 2% CaCl_2 . Что касается НКШ-1 и ТНК-1, то они действуют синхронно.

Исследование влияния добавок НКШ-1 и ТНК-1 на сроки схватывания и равномерность изменения объема цемента

По влиянию на сроки схватывания цемента можно оценивать пригодность добавок в качестве ускорителей схватывания. Равномерность изменения объема — это нормируемая характеристика для общестроительных цементов, которая должна обеспечиваться в 100% случаев.

Экспериментальные результаты, представленные в табл. 4, показали, что ввод химических добавок способствует сокращению сроков схватывания цемента. Добавки НКШ-1 и ТНК-1 по сравнению с CaCl_2 действуют более интенсивно, сокращая начало схватывания на 40–140 минут, а окончание схватывания на 70–165 минут (в зависимости от дозировки). Значительное сокращение сроков схватывания в присутствии добавок, содержащих $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, может представлять интерес при производстве различного рода ремонтных работ, в т.ч. аварийных, когда требуется быстрая ликвидация протечек.

Таблица 3

Результаты определения консистенции цементного раствора по стандарту для тампонажного цемента							
Вязущая основа (цемент)	Наименование добавки к вязущей основе*	Ввод добавки в цемент, %	Растекаемость, мм	Водоотделение, мл	Начальная консистенция, Вс	Консистенция через 90 мин. при 22°C, Вс	Время загустевания при 75°C, мин.
Без минеральных добавок	Без добавки (контрольная проба)	0	210	9,6	6	8	75
	CaCl_2	0,5	235	8,5	5	8	75
		1,0	231	6,2	6	8	66
		2,0	199,5	4,2	6	8	62
	НКШ-1	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0,5	180	5,5	7	14	74
		$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 1,0	177	3,2	7	20	72
		$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 2,0	173	0	8	28	69
	ТНК-1	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0,5	220	3,0	6	9	75
		$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 1,0	220	2,0	6	10	73
		$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 2,0	220	1,0	6	12	69
С минеральными добавками	Без добавки (контрольная проба)	0	220	10,0	5	6	86
	CaCl_2	1,0	220	5,4	5	7	79
	НКШ-1	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 1,0	218	2,3	7	9	74
	ТНК-1	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 1,0	220	2,6	5	8	76



Таблица 4

Результаты определения сроков схватывания при испытаниях по стандартам для общестроительного цемента			
Наименование добавки к вяжущей основе*	Ввод добавки в цемент, %	Начало схватывания, ч-мин.	Окончание схватывания, ч-мин.
Без добавки (контрольная проба)	0	2-40	3-35
CaCl ₂	0,5	2-10	3-05
	1,0	1-45	2-00
	2,0	0-25	1-10
НКШ-1	Ca(NO ₃) ₂ 0,5	2-00	2-25
	Ca(NO ₃) ₂ 1,0	1-30	2-00
	Ca(NO ₃) ₂ 2,0	0-20	0-50
ТНК-1	Ca(NO ₃) ₂ 0,5	1-35	2-10
	Ca(NO ₃) ₂ 1,0	1-00	1-50
	Ca(NO ₃) ₂ 2,0	0-20	0-50

* В качестве вяжущей основы использован общестроительный цемент с минеральными добавками.

Исследование влияния добавок НКШ-1 и ТНК-1 на прочностные показатели цемента

Прочностные показатели цементов определялись в разные сроки и при разных условиях:

- при испытаниях по стандарту для тампонажного цемента — через 2 суток твердения при температуре 22°C и через 1 сутки твердения при температуре 75°C;
- при испытаниях по стандартам для общестроительного цемента с монофракционным песком после ТВО по режиму ГОСТ 310.4 — через 3 и 28 суток нормального твердения, а с полифракционным песком — через 2 и 28 суток нормального твердения. Результаты этих испытаний приведены в табл. 5–7.



Рис. 3. Внешний вид образцов-лепешек после испытаний на равномерность изменения объема

Таблица 5

Результаты определения прочностных показателей при испытаниях по стандарту для тампонажного цемента (ГОСТ 26798.1)						
Вяжущая основа (цемент)	Наименование добавки	Ввод добавки в цемент, %	Предел прочности через 2 суток твердения при 22°C, МПа		Предел прочности через 1 сутки твердения при 75°C, МПа	
			при изгибе	при сжатии	при изгибе	при сжатии
Без минеральных добавок	Без добавки (контрольная проба)	0	4,5	16,7	6,4	30,9
	CaCl ₂	0,5	5,2	22,3	6,3	34,0
		1,0	5,2	22,9	6,0	41,3
		2,0	5,1	24,3	6,4	35,3
	НКШ-1	Ca(NO ₃) ₂ 0,5	3,7	12,9	6,8	31,8
		Ca(NO ₃) ₂ 1,0	3,3	11,8	6,1	28,9
		Ca(NO ₃) ₂ 2,0	3,0	9,5	6,0	26,5
	ТНК-1	Ca(NO ₃) ₂ 0,5	3,0	9,1	6,7	32,2
		Ca(NO ₃) ₂ 1,0	3,0	8,9	6,3	29,6
		Ca(NO ₃) ₂ 2,0	3,0	8,7	6,0	27,6
С минеральными добавками	Без добавки (контрольная проба)	0	3,4	9,2	5,6	23,6
	CaCl ₂	1,0	3,5	10,6	6,0	24,1
	НКШ-1	Ca(NO ₃) ₂ 1,0	2,4	6,3	4,2	16,6
	ТНК-1	Ca(NO ₃) ₂ 1,0	2,3	6,1	4,6	17,4

Таблица 6

Результаты определения прочности при испытаниях цементного раствора с монофракционным песком по ГОСТ 30744			
Наименование добавки	Ввод добавки в цемент, %	Предел прочности через 1 сутки твердения при 75°C, МПа	
		при изгибе	при сжатии
Без добавки (контрольная проба)	0	6,4	30,9
НКШ-1	Ca(NO ₃) ₂ 0,5	6,8	31,8
ТНК-1	Ca(NO ₃) ₂ 0,5	6,7	32,2

Таблица 7

Результаты определения прочности при испытаниях цементного раствора с полифракционным песком по ГОСТ 30744					
Наименование добавки	Ввод добавки в цемент, %	Предел прочности в нормальных условиях твердения, МПа			
		через 2 суток		через 28 суток	
		при изгибе	при сжатии	при изгибе	при сжатии
Без добавки (контрольная проба)	0	3,2	12,7	6,6	38,5
CaCl ₂	1,0	2,9	14,5	6,3	43,6
НКШ-1	Ca(NO ₃) ₂ 1,0	3,2	12,8	7,2	46,8
ТНК-1	Ca(NO ₃) ₂ 1,0	3,1	12,2	7,2	43,3

По данным табл. 5 видно, что при испытаниях по стандарту для тампонажных цементов характер воздействия добавок, содержащих Ca(NO₃)₂, на прочность зависит от температурного режима твердения и состава цемента. При твердении в условиях низких и нормальных температур (22°C) в присутствии НКШ-1 и ТНК-1 наблюдается довольно значительное снижение прочности цемента (как без минеральных добавок, так и с добавкой доменного шлака), причем более очищенный продукт ТНК-1 снижает прочность даже в большей степени, чем содержащий хвосты белитового шлама НКШ-1. Возможно, при более длительных сроках твердения, чем предусмотрено ГОСТ 1581 (при твердении в условиях низких и нормальных температур нормируется прочность через 2 суток после затворения), результаты испытаний окажутся иными. Содержащийся в составе НКШ-1 кремнезем может образовывать дополнительные продукты гидратации, что должно способствовать упрочнению цементного камня. При твердении в условиях умеренных температур (75°C) малые добавки НКШ-1 и ТНК-1 (0,5% от массы цемента), наоборот, вызывают небольшое (5–6% при изгибе, 3–4% при сжатии) повышение прочности цементного раствора на основе портландцемента без минеральных добавок.

При увеличении количества добавок до 1–2% отмечается падение прочности на 5–7% при изгибе и на 6,5–14,0% при сжатии. Следует отметить, что прочность при сжатии — показатель факультативный, т.к. техническими требованиями к тампонажным цементам ПЦТ I и ПЦТ II он не нормируется. В отношении прочностных показателей растворов на основе портландцемента с минеральными добавками, независимо от условий твердения, при вводе НКШ-1 и ТНК-1 отмечается довольно значительное падение прочности — до 25–30%, из чего следует, что более эффективными

исследуемые продукты являются для бездобавочных цементов типа ПЦТ I.

При испытаниях по стандартам для общестроительных цементов (с монофракционным песком по ГОСТ 310.4, с полифракционным песком по ГОСТ 30744) отрицательного воздействия химических добавок, содержащих нитрат кальция, на прочность не выявлено, по крайней мере, в пределах опробованных дозировок. При испытаниях с монофракционным песком (см. табл. 6) ввод добавки ТНК-1 в дозировке от 0,5 до 2,0% (по Ca(NO₃)₂) не ухудшает прочностных показателей цемента при твердении в нормальных условиях, а при тепловлажностной обработке дозировка не должна быть выше 1%. В этом случае потеря прочности практически не наблюдается. Через 28 суток твердения вообще не отмечено снижения прочности относительно контрольной пробы, а при увеличении дозировки добавки до 1–2% выявлен рост марочной прочности на 1,3–1,8 МПа. Добавка НКШ-1 в ранние сроки твердения и при ТВО по эффективности не уступает хлориду кальция — с ростом дозировки Ca(NO₃)₂ от 0,5 до 2,0% увеличивается прирост прочности при изгибе и сжатии. Через 28 суток твердения темпы нарастания прочности несколько замедляются, но рост, тем не менее, отмечается — на 0,8–1,9 МПа относительно контрольного цемента в зависимости от дозировки добавки.

При испытаниях с полифракционным песком (см. табл. 7) ранняя прочность (через 2 суток нормального твердения) цементов с добавками НКШ-1 и ТНК-1 находится на уровне контрольной пробы, уступая прочности цемента с добавкой CaCl₂. Через 28 суток твердения выявлено существенное увеличение этого параметра в присутствии добавок Ca(NO₃)₂. Эффективность ТНК-1 примерно равна CaCl₂ — с его добавлением прочность пробы относительно контрольной



возрастает на 4,8 МПа. Добавка НКШ-1 показала себя еще более эффективной — отмечен прирост прочности 8,3 МПа.

На разницу в характере воздействия $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ на прочность общестроительного цемента при испытаниях по разным стандартам скорее всего оказало влияние различие в зерновом составе песка. Полифракционный песок позволяет получить более плотную упаковку цементного раствора, обеспечивающую хороший контакт заполнителя с компонентами цемента, в т.ч. с аморфными кремнеземистыми хвостами белитового шлама, которые в течение длительного периода твердения успевают образовать дополнительные соединения с первичными продуктами гидратации цемента.

Все это в совокупности позволяет при вводе добавок НКШ-1 или ТНК-1 из рядового цемента типа ЦЕМ II класса 32,5 получить цемент более высокого класса прочности — 42,5. При испытаниях с монофракционным песком цементы остаются в пределах одной марки по прочности — 400.

Заключение

Анализ выполненных исследований позволяет сделать следующие выводы.


Более технологичным представляется порошок НКШ-1. При использовании надежной водонепроницаемой упаковки этот продукт будет сохранять сыпучесть. Для использования в цементных растворах показатель рН водного раствора НКШ-1, очевидно, должен быть не менее 6 (оптимально — не менее 7). НКШ-1 может представлять интерес в качестве модификатора бетона и цементного раствора, ускоряющего схватывание. Учитывая положительное действие НКШ-1 на прочностные показатели общестроительного цемента, возможно сокращение технологического цикла изготовления железобетонных изделий в опалубке при использовании этой добавки, а также модификация цементных растворов при проведении технической мелиорации грунтов по технологии струйной цементации.

Усилить эффективность НКШ-1 возможно при грамотном подборе ассортимента инертных заполнителей для бетона, на что указывает разница в приросте прочности при испытаниях с использованием моно- и полифракционного песка.

НКШ-1 способствует интенсификации саморазогрева цементного раствора, причем его температура на 1–2°C превышает температуру раствора с добавкой CaCl_2 , широко использующегося в качестве противоморозной добавки при зимнем бетонировании. В этом направлении перспективы НКШ-1 также просматриваются, учитывая положительное влияние данной добавки на раннюю прочность общестроительного цемента в условиях нормального твердения. В то же время необходимо определить тепловыделение растворов с НКШ-1, чтобы исключить трещинообразование в затвердевшем цементном камне.

НКШ-1 интенсивно снижает водоотделение тампонажного раствора. С учетом действия этой добавки на прочностные показатели наиболее эффективно использовать ее в тампонажных растворах на основе цемента типа ПЦТ I (тампонажный цемент без минеральных

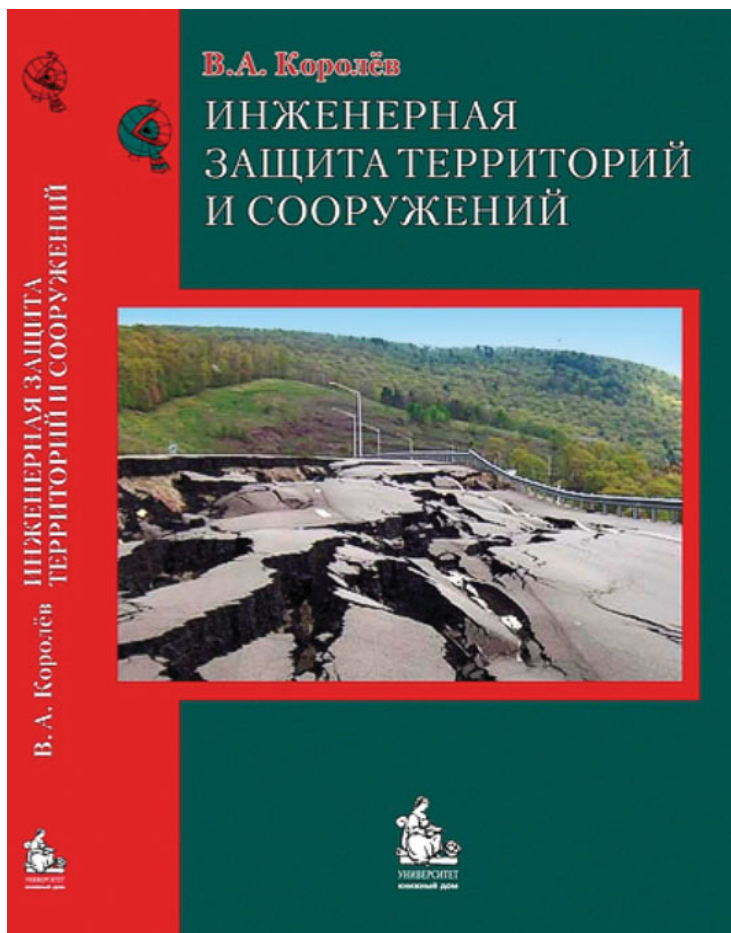
добавок) для умеренных температур. В цементах для низких и нормальных температур и типа ПЦТ II добавка НКШ-1 недостаточно эффективна. В связи с этим в дальнейшем необходимо провести исследования и оценить влияние добавок в зависимости от минералогического состава цементов, в т.ч. тампонажного цемента, особенно низкоалюминатного типа G.

Для более полного представления о действии изучаемых продуктов на строительные и тампонажно-технические свойства цементов помимо подбора оптимальной дозировки в последующем целесообразно изучить кинетику твердения тампонажных и общестроительных цементов, сульфатную коррозию цементного камня, деформативные свойства, склонность к высолообразованию, тепловыделение, долговечность и др. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов А.И., Макаренко П.П., Проселков Ю.М. Буровые промывочные и тампонажные растворы: учебное пособие для вузов. М.: Недра, 1999. 424 с.
2. Глекель Ф.Л. Физико-химические основы применения добавок к минеральным вяжущим. Ташкент, УзССР: Фан, 1975. 198 с.
3. ГОСТ 1581-96. Портландцементы тампонажные. Технические условия. М.: Минстрой России, МНТКС, 1996.
4. ГОСТ 30744-2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. М.: Госстрой России, МНТКС, 2001.
5. ГОСТ 310.1-76*. Цементы. Методы испытаний. Общие положения. М.: Госстрой СССР, 1976 (по сост. на 2008 г.).
6. ГОСТ 310.2-76*. Цементы. Методы определения тонкости помола. М.: Госстрой СССР, 1976 (по сост. на 2008 г.).
7. ГОСТ 310.3-76*. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема. М.: Госстрой СССР, 1976 (по сост. на 2008 г.).
8. ГОСТ 310.4-81*. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. М.: Госстрой СССР, 1976 (по сост. на 1992 г.).
9. ГОСТ 31108-2003. Цементы общестроительные. Технические условия. М.: Госстрой России, МНТКС, 2003.
10. ГОСТ 5382-91. Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа. М.: Госстрой СССР, 1991.
11. Грапп В.Б., Ратинов В.Б. Применение химических добавок для интенсификации процесса производства и повышения качества бетона и железобетона. Рига: Изд-во ЛатНИИИТИ, 1979. 38 с.
12. Данюшевский В.С., Алиев Р.М., Толстых И.Ф. Справочное руководство по тампонажным материалам. М.: Недра, 1987. 373 с.
13. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов: монография. Пермь: Пресстайм, 2007. 168 с.
14. Рябоконе С.А. Технологические жидкости для заканчивания и ремонта скважин. Краснодар: Изд-во ОАО НПО «Бурение», 2006. 264 с.
15. ТУ 2181-039-32496445-2004. Кальций азотнокислый 4-водный (кальциевая селитра). Буй: ОАО «Буйский химический завод», 2013. URL: http://www.bhz.kosnet.ru/Rus/Prod/Tech/NK_01.html.

ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ТЕРРИТОРИЙ И СООРУЖЕНИЙ



В.А.Королев: «Инженерная защита территорий и сооружений»:

учебное пособие // Под ред. В.Т.Трофимова.

М.: КДУ, 2013. 470 с., 275 ил., 33 табл.

ISBN 978-5-906226-28-0

УДК [004:55](076.6)

ББК 26.3ф1я73-1+32.973.26-018.2я73-1

Гриф УМО по классическому университетскому образованию для студентов вузов, обучающихся по направлению 020700 — «Геология».

Рецензенты:

- Кафедра инженерной геологии РГГРУ, зав. кафедрой профессор В.В. Пендин;
- Директор ОАО ПНИИИС, кандидат геол.-мин. наук М.И. Богданов.

Учебное пособие посвящено вопросам инженерно-геологического обоснования и организации инженерной защиты территорий, зданий и сооружений от опасных геологических, инженерно-геологических и других природных процессов: оползней, селей, наводнений, подтопления, абразии, криогенных процессов и т.п. Впервые в пособии рассмотрен весь комплекс современных методов инженерной защиты.

Подробно охарактеризованы методы, технологии и мероприятия инженерной защиты территорий и объектов, особенно широко представлены современные технологии, основанные на применении инновационных геокомпозитных и геосинтетических материалов. Рассмотрены особенности обоснования систем инженерной защиты от разных видов опасных геологических процессов, а также вопросы организации комплексных систем инженерной защиты территорий и сооружений.

Пособие предназначено для студентов геологических специальностей вузов, обучающихся по направлению «Геология», а также аспирантов и широкого круга специалистов — инженер-геологов, геоэкологов, экогеологов, гидрогеологов, геокриологов, строителей, гидротехников, а также работников административных органов управления.