

### Заключение

Снежный покров в районах распространения высотно-поясных (горно-таёжный, горно-редколесный и горно-тундровый) типов мерзлотных ландшафтов по химическому составу гидрокарбонатный кальциевый, с малым содержанием сульфатов, что связано с низким уровнем техногенного давления в регионе. Преобладающее влияние на процессы формирования химического состава снежного покрова в горных мерзлотных ландшафтах оказывают соли континентального происхождения.

Суммарное поступление растворимых и нерастворимых форм компонентов в снежный покров закономерно возрастает с высотой и колеблется от 32 т/км<sup>2</sup> в горно-таёжных ландшафтах до 44 т/км<sup>2</sup> в более высокогорных ландшафтах горных тундр. Во всех типах высотно-поясных горных ландшафтов растворимые (ионные) формы преобладают над пылевыми в соотношении 6:1.

В распределении микроэлементов наблюдается отклонение от высотной зональности, связанное с формированием положительной аномалии (S, C, Mn, Cu, H<sup>3+</sup>) в снежном покрове ландшафтов горных тундр в пределах рудных зон Эльконского рудного узла. Формирование геохимической аномалии обусловлено потоками

типоморфных элементов в подошвенную часть снега над рудными зонами.

### Литература

1. Наумов С.С., Шумилин М.В. Урановые месторождения Алдана // Отеч. геология. 1994. № 11/12. С. 20–23.
2. Лоскутов Е.Е. Поэлементная геохимическая база данных участка Сохсолоох // Казанская наука. 2011. №2. С. 278–279.
3. Сериков С.И., Железняк М.Н., Жижин В.И. Криогенные процессы в современном рельефообразовании Эльконского горного массива // Наука и образование. 2012. №1. С.40–44.
4. Макаров В.Н. Геохимия снежного покрова таёжных и горных мерзлотных ландшафтов Якутии / Лед и снег. 2014. №1. С. 73–80.
5. Макаров В.Н., Федосеев Н.Ф., Федосеева В.И. Геохимия снежного покрова Якутии. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1990. 152 с.
6. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 182 с.
7. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. М.: Мин. охраны окружающей среды РФ, 1992. 48 с.

Поступила в редакцию 12.04.2016

УДК 631.6:571.56

## Грунтовые мелиоративные каналы в зоне вечной мерзлоты: тепловой и механический аспект взаимодействия с окружающей средой

Р.В. Чжан

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

*Сложные инженерно-геокриологические условия Якутии ставят перед проектировщиками немало проблем, необходимость решения которых назрела уже давно. Проектирование устойчивых профилей мелиоративных грунтовых каналов с учетом гидрологических, гидрогеологических, геокриологических и гидравлических особенностей их работы требует особого углубленного изучения процессов, происходящих в грунтах основания каналов во время их строительства и эксплуатации. Этим объясняется отсутствие региональных норм по проектированию, строительству и эксплуатации грунтовых каналов, т.е. отсутствие правовой основы при проектировании. Настоящие исследования позволяют закрыть некоторые геокриологические аспекты работы грунтовых каналов. В*

ЧЖАН Рудольф Владимирович – д.т.н., г.н.с., zhan@mpi.ysn.ru.

статье рассматриваются геокриологические особенности работы открытых грунтовых каналов при мелиорации земель в различных мерзлотно-грунтовых условиях криолитозоны Якутии. Приведены результаты натурных исследований теплового и механического взаимодействия водного потока в каналах, даны рекомендации по расчету устойчивого поперечного профиля.

Ключевые слова: криолитозона, грунтовый канал, многолетнемерзлые грунты, температура, льдистость, сопротивление сдвигу.

## Soil Meliorative Channels in Permafrost Zone: Heat and Mechanical Aspect of Interaction with the Environment

R.V. Zhang

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk*

*In Yakutia, designers must cope with many geotechnical problems associated with complicated permafrost conditions. In order to design stable profiles for reclamation earthen canals with consideration for hydrological, hydrogeological, geocryological and hydraulic factors, special in-depth studies are required to understand the processes occurring in foundation soils during canal construction and operation. This explains the lack of regional design, construction and operation codes for earthen canals, i.e. the absence of a legislative basis for designing. The present study covers some of the geocryological aspects of earthen canal performance. The paper discusses the geocryological features of open earthen canals used for land reclamation in different permafrost-soil conditions of the cryolithozone of Yakutia. It presents the results of field investigations on thermal and mechanical interaction of the water flow in canals and provides recommendations for designing a stable cross-section.*

Key words: permafrost, ground channel, permafrost, temperature, ice content, shear strength.

### Введение

Исходя из особенностей работы мелиоративных грунтовых каналов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов, важнейшую роль в устойчивости русла играют процессы теплового и механического взаимодействия ложа с водным и воздушным потоками. Экспериментальными работами установлено, что мерзлый грунт подвергается эрозии водным потоком практически при очень малых скоростях с температурой потока около 0,5–1 °С [1]. Известно также, что для устойчивости талых частичек грунта существенную роль играют мощность слоя оттаивания и влажность.

Существует мнение [2], что сопротивляемость размыву связного грунта увеличивается вследствие перегружающего действия слоя воды. В то же время для мерзлого массива наличие на его поверхности водного потока и определенного слоя оттаявшего грунта резко сокращает теплоток в мерзлую зону, сохраняя его в мерзлом состоянии [3–4]. Для устойчивости

русла в целом существенную роль играет максимальная глубина оттаивания грунта, например, для случая залегания под дном и откосами канала повторно-жильных льдов. Глубину сезонного оттаивания можно регулировать режимом затопления канала и толщиной водного потока. Поэтому для разработки практических рекомендаций в условиях криолитозоны по устройству мелиоративных каналов необходимо тщательно исследовать вопросы теплового и механического взаимодействия водного потока с тальми, протаивающими и мерзлыми грунтами.

Краткий обзор направлений исследований теплообмена и размываемости грунтов водным потоком, а также состояния вопросов проектирования, строительства и эксплуатации грунтовых мелиоративных каналов изложен в работах [5–8].

Для мелиорации земель в Якутии применяются два основных типа открытых грунтовых каналов: 1) ирригационные и 2) осушительные.

Каналы первого типа используются при обводнении и орошении сельскохозяйственных угодий. Вода в них может находиться кратковременно (например, подача воды на лиманы весной) и длительный период (например, весь

---

ЧЖАН Рудольф Владимирович – д.т.н., г.н.с., zhan@mpi.ysn.ru.

период вегетации растений). Каналы второго типа применяются для осушения заболоченных участков пойм мелкодолинных рек и аласных котловин. Особенностью режима их работы является то, что после осушения они используются уже как оросительные, по которым в весенний период вода подается на орошаемый массив, а после того как будет проведено орошение, они вновь играют роль водосборно-сбросных трактов.

Обследование ряда мелиоративных систем Якутии свидетельствует о том, что в процессе эксплуатации грунтовые каналы подвержены значительным деформациям. Анализ состояния проектно-изыскательских работ показал, что отсутствуют нормативные документы по проектированию, строительству и эксплуатации грунтовых каналов в условиях вечной мерзлоты. При этом проектирование трасс каналов ведется без учета геоэкологических условий территории строительства, а также процессов, происходящих в оттаивающих, промерзающих и мерзлых грунтах во время эксплуатации каналов при взаимодействии их с воздухом и водой.

Целью настоящих исследований явилось изучение процессов взаимодействия грунтовых мелиоративных каналов с окружающей средой, установление причин потери их устойчивости и разработка рекомендаций по повышению их эксплуатационной надежности.

#### **Состав и методика исследований**

Было обследовано более 150 км открытых грунтовых каналов 7 ирригационных систем Якутии. Детальные натурные исследования были поставлены на действующих Халаанской и Хоробутской системах лиманного орошения в Центральной Якутии.

В состав исследований на *Халаанской системе лиманного орошения* входило: измерение температуры воздуха; температуры грунта в канале и на естественной площадке; температуры и глубины воды в канале и на заливаемых площадях; скорости течения воды в канале; скорости ветра; мощности снежного покрова; наблюдения за динамикой сезонного протаивания грунта.

На *Хоробутской системе лиманного орошения* состав исследований был несколько расширен и дополнительно включал следующие виды: градиентные температурные измерения в грунте (дно, откосы); температура грунта вне зоны действия канала; тепловой поток на сухих откосах и под водой; влажность грунта; влажность воздуха. Исследования проводились по общепринятым методикам в гидрометрии, актинометрии, грунтоведении и мерзлотоведении [9].

#### **Результаты экспериментальных исследований**

Рассмотрение динамики температурного режима грунтов основания мелиоративных каналов начнем с определяющих факторов – влажности грунтов и снежного покрова.

*Динамика влажности грунтов мелиоративных каналов* в Якутии отражает специфику их работы, а именно периодичность затопления и ежегодное промерзание–протаивание грунтов ложа канала.

Рассматривая распределение влажности грунтов в поперечном сечении каналов, следует отметить, что оно носит осесимметричный характер, отражая естественный режим в бортах и особенности затопления и подтопления дна и откосов в процессе эксплуатации. Анализ данных показывает, что в верхних незатопляемых уровнях влажность грунтов сезоннопротаивающего слоя зависит от количества выпадающих атмосферных осадков. За период наблюдений влажность этого слоя составила 12 %. На дне канала и затопляемых частях откосов динамика влажности четко отражает весеннее затопление и зимнее промерзание грунта. В верхних слоях (0,2–0,3 м) влажность грунта повышается до 30–40 %, что на 10–20 % превышает исходные первоначальные значения. Влажность грунтов на глубине 10–15 м остается постоянной в пределах полной влагоемкости 23–25 %.

*Динамика снежного покрова в каналах Хоробутской и Халаанской мелиоративных систем.* Устойчивый снежный покров образуется в конце первой декады октября и в течение зимы постоянно нарастает. В начале зимы, когда преобладает безветрие, снег по профилю канала ложится равномерно. С наступлением ветреной погоды (конец февраля – начало марта) характер накопления снега меняется, но не существенно. Так средняя по профилю канала высота и плотность снега на Хоробутской системе лиманного орошения составили 48,3 см и 0,15 г/см<sup>3</sup>, а на Халаанской – 49,8 см и 0,13 г/см<sup>3</sup>. Максимальная высота снежного покрова в отдельные годы на Хоробуте достигала в феврале 56 см при плотности 0,08 г/см<sup>3</sup>. Это на 15,8 см больше значения высоты снежных по сравнению с естественными условиями.

Разрушение снежного покрова на естественных открытых площадках начинается в первой декаде мая. В каналах снег на откосах северной экспозиции лежит вплоть до пропуска воды по ним. Снежный покров, несмотря на относительно небольшую высоту, играет определенную теплозащитную роль. Об этом наглядно свидетельствует динамика температурного режима грунтов основания канала, описанная ниже.

**Наблюдения за температурным режимом грунтов.** На Хоробутской системе лиманного орошения наблюдения были начаты после двадцати лет эксплуатации (с апреля 1986 г.). Проводились они по трем скважинам глубиной 10 м и шести скважинам глубиной от 2 до 3 м, а также по опорной скважине 23 глубиной 20 м, пробуренной в 1969 г. Детально исследовался температурный режим слоя сезонного протаивания грунтов, в котором наиболее динамично происходят процессы взаимодействия канала с окружающей средой. По глубоким скважинам исследовалось влияние канала на температурный режим многолетнемерзлых грунтов его основания.

Динамика температурного режима грунтов в основании канала Хоробутской системы лиманного орошения свидетельствует о том, что грунты основания находятся в периодически установившемся режиме (рис. 1). Сравнение распределения температуры грунтов по глубине в канале с естественной площадкой показало, что строительство канала изменило естественное температурное поле в сторону повышения их температуры. Так, среднегодовая температура грунтов в слое годовых колебаний температуры в естественных условиях составляет  $-3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После строительства и 20-летней эксплуатации канала она повысилась до  $-2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  в откосах и до  $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  в основании.

Температура грунтов на глубине годовых колебаний изменилась от  $-3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  в откосах и до  $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в основании канала. Тепловое влияние канала сказывается на расстоянии 50–55 м от его оси.

Анализируя температурный режим грунтов сезоннопротаивающего–промерзающего слоя ложа канала, следует констатировать, что, наряду с другими факторами, в целом он формирует температурное поле основания. Процесс оттаивания

грунтов канала начинается в обычные для Центральной Якутии сроки: в конце апреля – начале мая (рис.2). Характерной особенностью динамики протаивания грунтов дна канала является четкая зависимость ее от влажностного режима грунтов и условий теплообмена на поверхности (наличие снега и воды). Так, с конца апреля по вторую декаду июня темп протаивания грунтов в период наблюдений был практически одинаков и составлял 1 см/сут. В последующий период при наличии воды в канале темп протаивания грунтов резко замедлялся и составлял 0,2–0,3 см/сут. Максимальная глубина протаивания была зафиксирована в первых числах ноября и составила 1,4 м. Затем началось интенсивное промерзание талого грунта сверху и снизу, завершающееся в первой декаде декабря.

В те годы, когда вода в канале отсутствовала, темп протаивания грунтов его основания, равный 1 см/сут, сохранялся до конца августа, а максимальная глубина протаивания в октябре составляла 230 см.

Температурный режим грунтов протаявшего слоя под дном канала отражает режимы затопления в весенне-летний период. Так, в 1990 г. до поступления воды в канал 15 мая средняя температура грунтов оттаявшего 50-сантиметрового слоя составляла  $7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При поступлении воды в канал 20 мая температура этого слоя резко понизилась до  $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Оттаявший слой (60 см) имел температуру  $7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Уровень воды за этот период изменялся от 5 см (20 мая) до 210 см (27 мая) и затем плавно понижался до 50 см (5 июня). К этому моменту при глубине оттаивания 75 см средняя температура грунтов слоя повысилась на  $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и составила  $8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура воды за этот период была  $13,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Эти данные свидетельствуют о том, что значительная часть солнечной энергии трансфор-

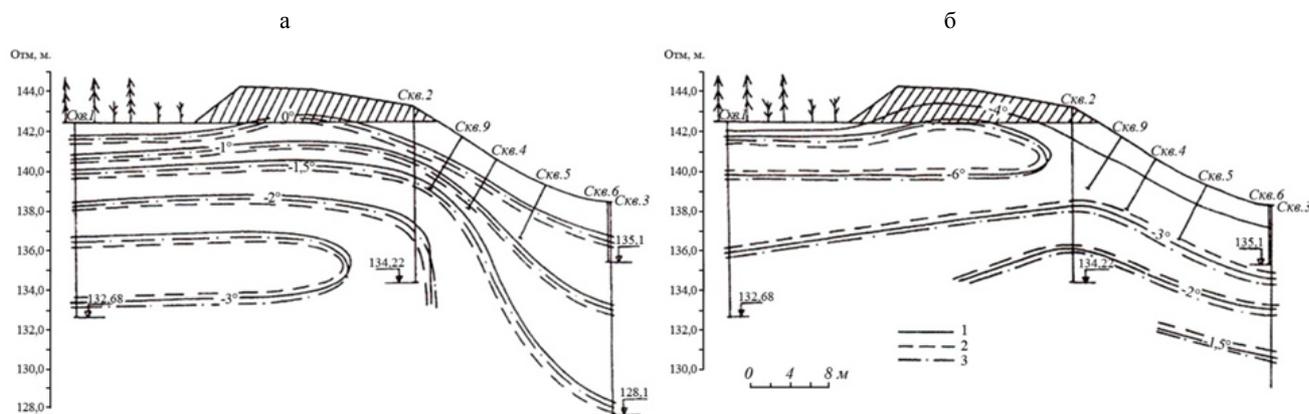
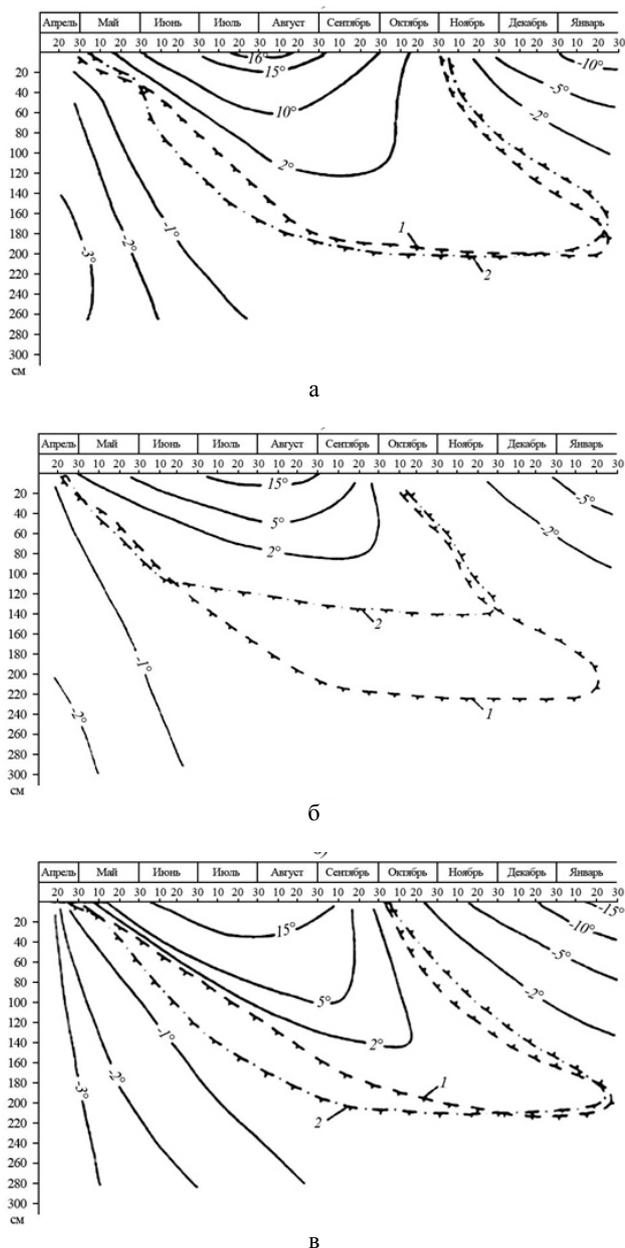


Рис. 1. Динамика температурного поля в основании магистрального канала Хоробутской системы лиманного орошения: а – апрель; б – август. 1 – 1986 г.; 2 – 1988 г.; 3 – 1990 г.

## ГРУНТОВЫЕ МЕЛИОРАТИВНЫЕ КАНАЛЫ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ



**Рис. 2.** Динамика температурного поля в сезоннооттаивающем–промерзающем слое грунтов основания магистрального канала на ПК 1+63 Хоробутской системы лиманного орошения: а – левый откос (скв. 5); б – дно (скв. 6); в – правый откос (скв. 7). 1 – граница мерзлоты 1987 г.; 2 – то же, 1989 г.

мировалась в водном потоке, что способствовало замедлению протаивания грунтов канала.

Температурный режим грунтов слоя сезонного промерзания откосов канала в зимний период характеризуется стабильностью из года в год. Средняя температура грунтов по глубине с января по апрель составляла  $-10,3^{\circ}\text{C}$ .

Общий анализ натурных данных динамики температурного режима грунтовых каналов мелиоративного назначения свидетельствует о

нарушении естественного температурного поля в сторону повышения температур. Причиной столь неожиданного для Центральной Якутии эффекта явилось наличие в ложе канала снежного покрова, мощность которого достигает в среднем за зимний период до 52 см, а также переувлажнение верхних горизонтов грунта, обусловленное затоплением канала летом, и перераспределение влаги в зимние периоды.

**Исследование процессов теплообмена грунтов канала с водным потоком.** При тепловом взаимодействии ложа водотока с атмосферой и водным потоком уравнение теплового баланса записывается следующим образом [3]:

$$Q_n = [Q_c(1 - A) - J_{эф} - P_n - LE]\tau_1 + Q_d\tau_2, \quad (1)$$

где  $Q_n$  – количество тепла, поступающего в поровый массив;  $Q_c = Q_{np} - Q_p$  – суммарная солнечная радиация;  $Q_{np}$  и  $Q_p$  – прямая и рассеянная коротковолновая радиация;  $J_{эф} = J_a - J_n$  – эффективное длинноволновое излучение;  $J_a - J_n$  – излучение атмосферы и встречное излучение поверхности земли;  $P_n$  – турбулентный теплообмен с атмосферой;  $L$  – удельная теплота испарения (конденсации);  $E$  – интенсивность испарения;  $Q_d$  – тепловой поток от воды в грунт;  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – время непосредственного воздействия на поровый массив солнечной радиации и водного потока.

Исходя из поставленной задачи, теплосбалансовые наблюдения были направлены на изучение теплового взаимодействия водного потока с ложем канала в короткой весенний период. Наряду с измерением общих параметров теплового баланса, были организованы наблюдения непосредственно за тепловым потоком на границе «водный поток – ложе канала». Это позволило существенно упростить решение задачи по определению глубины оттаивания грунтов в канале.

Величина теплового потока от воды в мерзлый массив через оттаявший слой грунта находится из следующего выражения:

$$q = \alpha_n(T_{вод} - T_n) = \frac{\lambda}{h}(T_n - T_0), \quad (2)$$

где  $q$  – плотность теплового потока в оттаивающий массив;  $\alpha_n$  – коэффициент теплообмена водного потока с грунтом;  $T_{вод}$  – температура воды;  $T_n$  – температура поверхности грунта;  $T_0$  – температура поверхности на границе оттаивания грунта, равная  $0^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности оттаивающих пород;  $h$  – толщина талого слоя.

Поскольку левая часть уравнения (2) показывает количество тепла, подводимое водой к поверхности грунта, а правая – количество тепла, отводящее через талый слой в мерзлый массив, то данное уравнение можно представить в следующем упрощенном виде:

$$q = \frac{\lambda}{h} T_n \quad (3)$$

Экспериментальные полевые исследования зависимости величины теплового потока в оттаивающий грунт от глубины затопления и толщины оттаивающего слоя представлены на рис. 3–5.

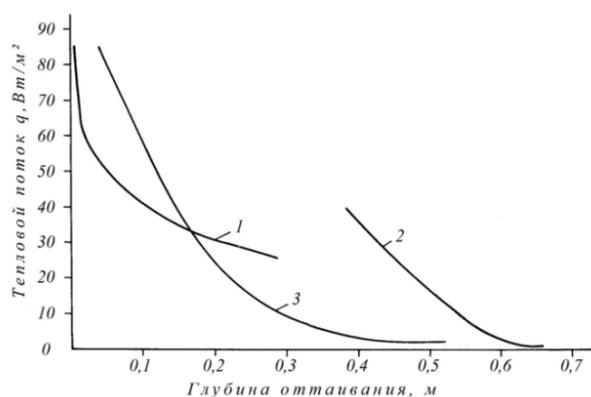


Рис. 3. Динамика теплового потока в основании магистрального канала Хоробутской системы лиманного орошения в зависимости от глубины оттаивания (натурные данные): 1 – сухой откос; 2 – дно, глубина воды 1 м; 3 – то же, глубина воды 0,01 м

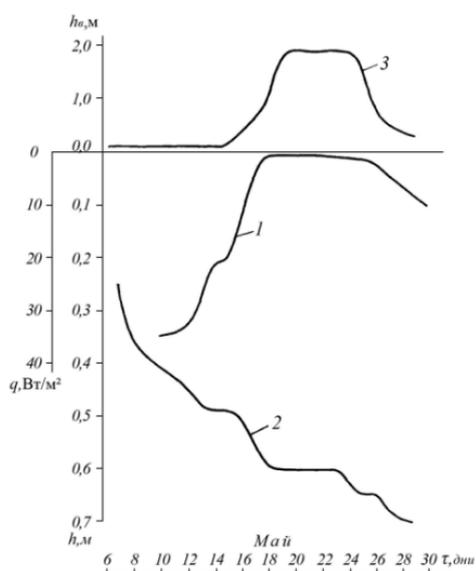


Рис. 4. Динамика теплового потока (1), глубина протавивания (2) и глубина воды (3) в магистральном канале Хоробутской системы лиманного орошения (натурные данные, 1989 г.)

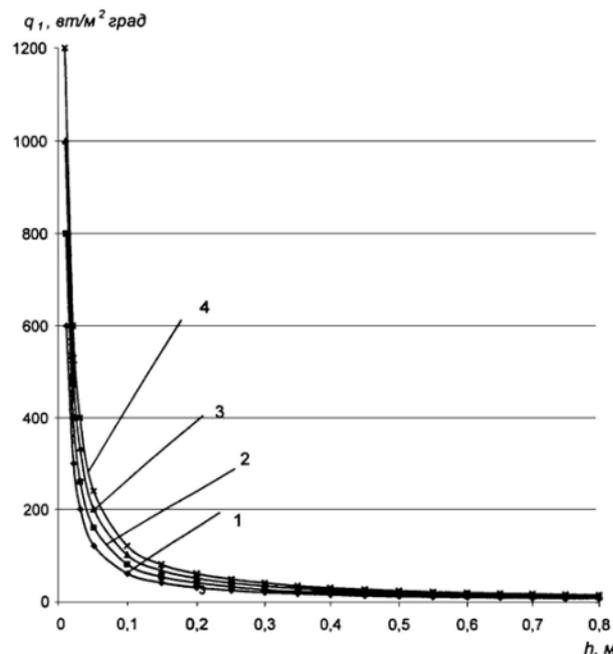


Рис. 5. Зависимость теплового потока ( $q$ ) в мерзлом основании канала от температуры поверхности ( $T_n$ ) и толщины оттаивающего слоя ( $h$ ): 1 –  $T_n = 6$  °C; 2 –  $T_n = 8$  °C; 3 –  $T_n = 10$  °C; 4 –  $T_n = 12$  °C

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что даже при незначительном увеличении толщины оттаивающего слоя грунта резко сокращается поступление тепла в массив. Так, для сухих грунтов откоса канала в конце апреля – начале мая при увеличении глубины оттаивания от 0 до 5 см величина теплового потока уменьшается от 85 до 51 Вт/м<sup>2</sup>, а при дальнейшем оттаивании до 30 см – до 32 Вт/м<sup>2</sup>. Анализируя влияние глубины воды в канале на величину поступления тепла в грунт его основания, следует отметить, что присутствие воды дополнительно, причем очень существенно, сокращает теплоток. При глубине воды от 5 до 10 см величина теплового потока уменьшилась от 80 до 8 Вт/м<sup>2</sup>, т.е. в 10 раз. Глубина оттаивания грунта составила 30 см. Дальнейшее увеличение глубины воды в канале до 1,9–2,0 м привело к уменьшению величины теплового потока до 0,01 Вт/м<sup>2</sup>. Это говорит о том, что практически все тепло, поступающее из атмосферы в этот период, аккумулировалось в водном потоке.

В естественных условиях, где расход водного потока не регулируется, происходит образование различных динамических форм рельефа. В искусственных сооружениях, какими являются каналы, поступление воды регулируется и это позволяет создавать некоторый защитный слой из талого грунта. Назначение этого слоя двойное: с одной стороны, он призван быть теп-

лоизолятором, препятствующим поступлению тепла в нижележащие многолетнемерзлые грунты, а с другой, является слоем, защищающим ложе канала от размыва.

Таким образом, появляется возможность регулировать процесс оттаивания грунтов в ложе каналов и создавать оптимальные режимы их эксплуатации. Это выражается, во-первых, в создании условий для консолидации оттаявшего слоя грунтов в канале перед принятием им водного потока и, во-вторых, в формировании определенного термического сопротивления, препятствующего оттаиванию многолетнемерзлых грунтов основания. Это, в свою очередь, позволило применять методику расчета каналов, широко используемых для талых грунтов, в частности по «допускаемым скоростям» потока [2, 10–11].

**Исследование прочностных и физико-механических свойств грунтов.** На действующих грунтовых каналах в полевых условиях для различных типов грунтов определялась основная расчетная характеристика – сопротивление сдвигу оттаявших грунтов. Исходя из теоретических и экспериментальных исследований физической сущности связности дисперсных пород следует, что силы сцепления между частицами имеют молекулярный, водно-коллоидный, электрический и кристаллизационный характер [12–15]. В мерзлых дисперсных грунтах, помимо указанных, действуют так называемые льдоцементные связи, которые нарушаются при переходе породы в положительный спектр температур. Грунты приобретают специфическое посткриогенное сложение, при котором прочностные, фильтрационные и другие свойства резко снижаются. Сопротивление размыву таких грунтов невелико, особенно в первый момент после оттаивания, так как порода в этот момент является дезинтегрированной за счет вытаявшего льда, а процессу консолидации ее препятствует взвешивающее действие воды.

Экспериментальные исследования показали, что сопротивление сдвигу грунтов в основном зависит от их влажности. Исследования по выявлению количественной зависимости этих параметров в песчаных и супесчано-суглинистых грунтах проводились в натурных условиях методами пенетрации и лопастного среза.

Характер изменения сопротивления сдвигу на различных промежутках изменения влажности грунтов носит сложный характер (рис. 6 и 7). Так, при малых значениях влажности (от 4 до 8%) сопротивление сдвигу высокое и составляет около 0,144 МПа. Изменение влажности до 16–20% влечет за собой резкое снижение сопротивления сдвигу до 0,006–0,004 МПа. Эти значения

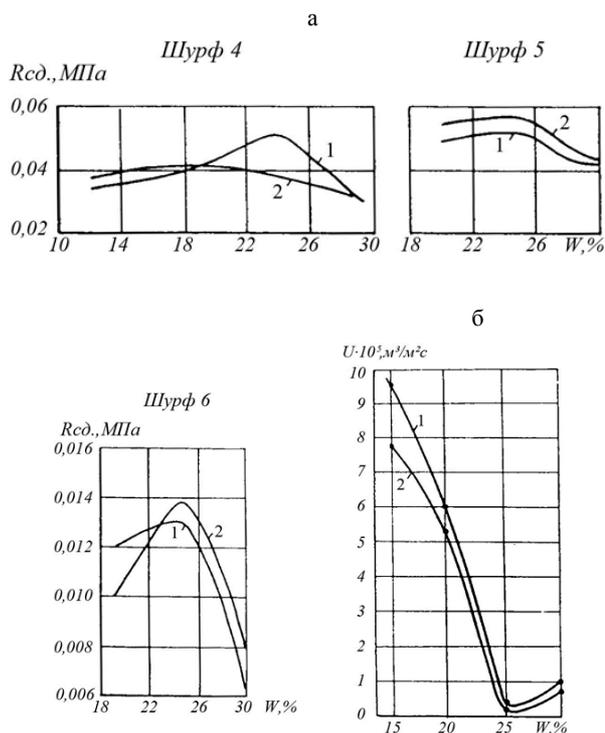


Рис. 6. Зависимость сопротивления сдвигу ( $R_{cd}$ ) супесчано-суглинистого грунта (а) и интенсивности его размыва ( $U$ ) (б) от влажности в естественных условиях

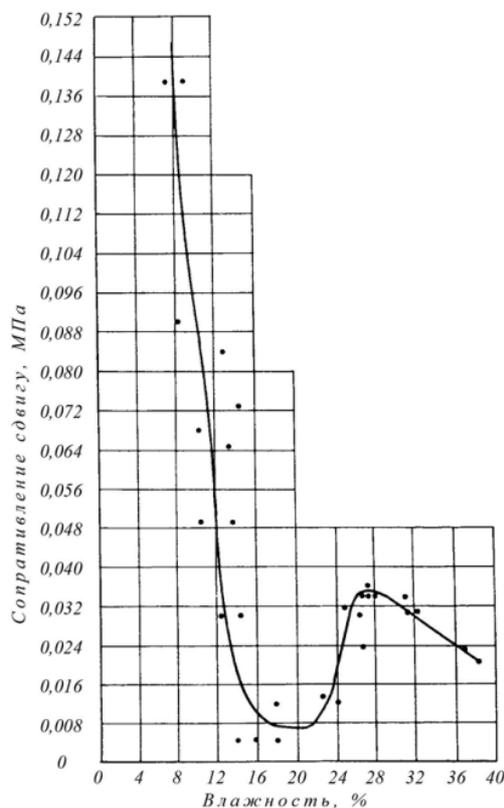


Рис. 7. Зависимость сопротивления сдвигу супесчано-суглинистого грунта от влажности (натурные данные)

влажности близки к пределу раскатывания. При увеличении влажности до значений 25–30 % (предел текучести) происходит резкое увеличение сопротивления грунтов сдвигу до 0,036 МПа. Последующее увеличение влажности ведет к резкому уменьшению сопротивления сдвигу (при  $W = 40\%$   $R_{cd} = 0,016$  МПа). Итак, левая и правая ветви кривой лежат в общепринятых представлениях зависимости сопротивления грунтов сдвигу от их влажности. Особый интерес представляет середина кривой – интервал влажности от 20 до 28%, на котором происходит повышение сопротивляемости грунтов сдвигу, т.е. понижение их размываемости. Данный экстремум совпадает с влажностью, соответствующей пластичной консистенции грунта, и является подтверждением того, что в данных пределах влажности преобладают силы сцепления, обусловленные водно-коллоидными пленками [16]. Полученные зависимости (рис. 6) хорошо согласуются с данными лабораторных исследований [17], которые получены для северо-восточных районов страны при выявлении зависимости интенсивности размыва связных грунтов от их влажности. В то же время автор обращает внимание на неоднозначность этих связей, что вполне допустимо, так как в зависимости от дисперсности грунтов изменяются пределы пластичных зон.

Таким образом, полученные данные сопротивления сдвигу грунта от его влажности имеют практическое значение. Кроме того, они позволяют проводить расчеты грунтовых каналов, используя известные зависимости [2]:

$$V_{дон} = 1,25 \sqrt{\frac{2gm}{2,6\gamma_{sp}n} [(\gamma_{sp} - \gamma_{вод})d + 1,25KR_{cd}]}, \quad (4)$$

где  $V_{дон}$  – допустимая донная скорость потока воды;  $\gamma_{вод}$  – удельный вес воды;  $\gamma_{sp}$  – удельный вес грунта;  $m$  – коэффициент условия работы;  $n$  – коэффициент учета пульсации скорости;  $K$  – коэффициент однородности грунта;  $R_{cd}$  – сопротивление сдвигу грунта;  $d$  – средневзвешенный диаметр грунтовых частичек.

### Выводы и рекомендации

На основании анализа опыта строительства, проведения натурных и аналитических исследований оказалось возможным сформулировать следующие выводы и рекомендации по устройству грунтовых мелиоративных каналов.

1. Выявлена специфика работы мелиоративных каналов в Якутии и определена роль сезоннопотаивающего слоя в формировании теплового режима и механической устойчивости ложа.

2. Установлен механизм деформаций каналов, в основе которого лежат геокриологические процессы, происходящие в грунтах ложа канала при взаимодействии их с окружающей средой.

3. Регулирование поступления воды в канал дало возможность формирования талого слоя в ложе канала. Толщина этого слоя для условий Центральной и Южной Якутии равна 30–40 см. Это позволило вести расчеты поперечного сечения канала по методикам, применяемым вне зоны распространения многолетнемерзлых пород.

4. В натуральных условиях получена основная прочностная характеристика супесчаносуглинистых грунтов – сопротивление их сдвигу, которую можно использовать при проектировании поперечного сечения каналов.

5. Трассирование каналов на местности следует проводить, руководствуясь следующими основными положениями:

а) проводящие-сбросные каналы должны проходить по пониженным местам с использованием естественных водотоков и тальвегов;

б) межгаласы участки проходить прямолинейно, изменение направления трассы делать на аласах с плавным радиусом закругления.

6. Мелиоративные каналы следует проектировать на основании требований действующих норм и инструкций вне зоны вечной мерзлоты, с учетом территориальных (региональных) особенностей: термокарст, термоэрозия, термоденудация, пучение, солифлюкция, изменение физико-механических свойств грунтов вследствие многократного протаивания–промерзания и др.

7. Необходимо избегать участки местности с наличием близко залегающих повторно-жильных льдов, однако при неизбежности устройства каналов на территории с ледовым комплексом следует предусмотреть, чтобы в процессе эксплуатации граница сезонного оттаивания под дном не захватывала повторно-жильные льды.

8. Поперечное сечение проводящих каналов следует принимать трапецеидальной формы, коэффициент заложения откоса от 3 до 6, близкой к параболической форме:

–поперечное сечение проводяще-водосборно-сбросных каналов устраивать в слое сезонного оттаивания по типу ложбин, проходимых для сельхозтехники; ширина канала по дну определяется из условий производства работ;

–гидравлический расчет каналов рекомендуется проводить для двух расчетных случаев: а) для проектного профиля на момент начала строительства; б) для эксплуатационного профиля с учетом изменений его в результате геокриологических процессов и зарастания расти-

тельностью. Изменение поперечного профиля в результате протаивания и осадки мерзлых грунтов определяется на основе теплотехнических расчетов по известным в мерзлотоведении методикам. Зарастание русла при уточнении пропускной способности канала следует учитывать путем увеличения коэффициента шероховатости.

9. При устройстве грунтовых каналов возможно использование следующих способов производства работ: а) послойная разработка грунта по мере его оттаивания; б) разработка мерзлого грунта в зимний период с помощью специальной землеройной техники и взрыва; в) размыв русла канала потоком воды.

10. Для каждого объекта необходимо разрабатывать проект мониторинга, который должен входить составной частью в общий проект.

11. Требуется дальнейшее совершенствование как методик изысканий и расчетов, так и технологий строительства и эксплуатации грунтовых каналов, а также разработка нормативной документации по их проектированию.

#### Литература

1. Кузьмин Г.П., Яковлев А.В. Подземные резервуары в мерзлых грунтах. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 1992. 152 с.
2. Миряхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М.: Колос, 1967. 179 с.
3. Перльштейн Г.З. Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.
4. Саввин Е.Д., Фёдоров Ф.М. Скорость оттаивания глинистых пород при размыве // Бюл. НТИ. Проблемы горного дела Севера ЯФ СО АН СССР. Якутск, 1981. С. 17–11.
5. Чжан Р.В., Мелкозеров Г.В. Особенности устройства и эксплуатации мелиоративных каналов Якутии. Рациональное природопользование в криолитозоне: Сб. научн. трудов. М.: Наука, 1992. С.86–92.
6. Гоголев Е.С. Прогнозы переформирования береговых склонов, каналов и водохранилищ в

районах многолетней мерзлоты: Автореф. дис. ... д.т.н. М., 1989. 48 с.

7. Арэ Ф.Э. Разрушение берегов арктических приморских низменностей / Ф. Э. Арэ; отв. ред. В. П. Мельников. Новосибирск: ГЕО, 2012. 289 с.

8. Павлов А.В., Оловин Б.А. Искусственное оттаивание мерзлых пород теплом солнечной радиации при разработке россыпей. Новосибирск: Наука, 1974. 117 с.

9. Чжан Р.В. Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. 208 с.

10. Замарин Е.А. Транспортирующая способность скоростей течения в каналах. М.; Л.: Госстройиздат, 1951.

11. Ибад-заде Ю.А. Водопроводные каналы (гидравлические и русловые расчеты). М.: Стройиздат, 1975. 192 с.

12. Terzaghy K. Theoretical Soil Mechanics. 1950. №4. P. 392–405.

13. Childs E.C., Collis-George N. The permeability of porous materials. Proc. Roy. Soc. 201 A. 1950. P. 392–405.

14. Дерягин Б.В., Абрикосова И.И. Прямые измерения молекулярного притяжения твердых тел // ЖЭТФ. 1956. Т.30, вып. 6. С. 993–1006.

15. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Изд-во по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. 636 с.

16. Zhang R.V. Thermal and mechanical interaction of earthen irrigation canal with frozen, thawing soils in permafrost areas. The Fourth International Symposium on Permafrost Engineering. 21–23 September, Lanzhou, China, 2000 // Journal of Glaciology and Geocriology. Published by Science press, Beijing. Suppe., 2000. V. 22. P. 129–136.

17. Самышин В.К., Перльштейн Г.З., Лавров Н.П. Исследование размываемости мерзлых дисперсных пород в лабораторных условиях // Вопросы инженерного мерзлотоведения при разработке многолетнемерзлых россыпных месторождений: Сб. научных трудов ВНИИ-1. Магадан, 1982. С. 52–58.

Поступила в редакцию 02.06.2016