

Геохимия снежного покрова горных мерзлотных ландшафтов Эльконского ураново-рудного района

А.Р. Кириллин, В.Н. Макаров

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

Исследован снежный покров в пределах Эльконского ураново-рудного района, расположенного в Южной Якутии. В ландшафтно-климатическом отношении это среднегорная подзона мерзлотно-таёжной области бореального пояса Восточной Сибири. Изучение окружающей среды в осваиваемом рудном районе имеет важное экологическое значение. Установлено, что химический состав снега исследованных типов горных ландшафтов гидрокарбонатно-кальциевый, с малым содержанием сульфатов. Преобладающее влияние на процессы формирования химического состава снежного покрова оказывают соли континентального происхождения, преимущественно соединения углерода. Суммарная плотность поступления растворимых и нерастворимых форм компонентов в снежный покров закономерно увеличивается с изменением высоты местности – при переходе от горно-таёжных к горно-тундровым территориям. Отмечается существенное преобладание поступления со снежным покровом растворимых форм компонентов в ландшафты. Распределение микроэлементов в снежном покрове не подчиняется высотной зональности. Максимальное содержание F, Sr и тяжёлых металлов (Mn, Cu) в снежном покрове наблюдается в ландшафтах горных тундр и обусловлено положительным вертикальным градиентом влагозапаса в снеге и расположением в ландшафтах горных редколесий и горных тундр рудных тел и эндогенных ореолов гидротермальных Au-U месторождений.

Ключевые слова: криосфера, геохимия, горы, ландшафты, снег, Якутия.

Geochemistry of Snow Cover of Mountain Permafrost Landscapes within the Elkon Uranium Ore District

A.R. Kirillin, V.N. Makarov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk

A snow cover within the Elkon uranium ore district located in South Yakutia is investigated. By landscape and climate relation it is a mid-taiga subzone permafrost boreal region of Eastern Siberia. The study of the environment in the mining district has mastered the important ecological value. It was found that the chemical composition of the investigated types of snow mountain landscape is hydro-calcium with low sulfate content. The dominant influence on the formation of the chemical composition of snow cover have salts of continental origin, mainly carbon compounds. The total density of the receipt of soluble and insoluble forms of the components in the snowpack increases regularly with changes in altitude - in the transition from mountain taiga to mountain-tundra territories. There is a significant prevalence of receipt with snow cover forms of soluble components in the landscape. Distribution of trace elements in the snowpack is not subject to high-altitude zoning. The maximum content of F, Sr, and heavy metals (Mn, Cu) in snow cover is observed in the landscapes of mountain tundra and due to positive vertical gradient of water stock in the snow and located in landscapes of mountain woodlands and mountain tundra ore bodies and endogenous halos of hydrothermal Au-U deposits.

Key words: cryosphere, geochemistry, landscapes, mountain, snow, Yakutia.

Введение

Планами промышленного освоения Южной Якутии предусмотрено строительство крупного горнодобывающего предприятия в Эльконском ураново-рудном районе. С экологических позиций важно получить информацию о фоновом состоянии окружающей природной среды до начала интенсивного техногенного воздействия. Изучение химического состава снежного покрова позволяет получить качественные и количественные характеристики сухих и влажных выпадений из атмосферы в холодный сезон, т. е. практически за полгода, в начальный период хозяйственного освоения района.

Снег является удобным индикатором химического загрязнения атмосферного воздуха и атмосферных осадков, а также последующего гидро- и литохимического загрязнения ландшафтов. Химические (содержание макро- и микроэлементов) и физические параметры снежного покрова (высота, плотность, влагозапас) в малоисследованном районе Южной Якутии необходимы для мониторинга загрязнения снежного покрова этой территории.

Район исследований расположен на территории Южной Якутии в центральной части Алданского нагорья (рис. 1).

Отбор проб снега проводился в конце марта – начале апреля (28.03–02.04.2015 г.). Все пункты наблюдений расположены на значительном (20–40 км) удалении от селитебных или промышленных зон. В каждом пункте проводилось 5–6 измерений высоты снежного покрова и опреде-

лений его плотности, измерялась температура воздуха и снега (на поверхности и на почве). Для химического анализа на пыль и растворимую фазу отбирались пробы на всю высоту снежного покрова. Химический анализ снеговой воды выполнен в лаборатории геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU 0001.518584), аналитики Л. Ю. Бойцова и О.В.Шепелева.

По ландшафтно-климатическому районированию это среднетаёжная подзона мерзлотно-таёжной области бореального пояса Восточной Сибири. В административном – Алданский район Республики Саха (Якутия), расположенный в 70 км на северо-восток от районного центра г. Алдан и в 20 км к юго-востоку от пос. Ыллымах.

В геологическом отношении район исследований находится в северной части Алданского щита в пределах Эльконского горста. Согласно металлогеническому районированию, это территория Эльконского золото-уранового района, где сосредоточены большие запасы урана и золота. Гидротермальные Au-U месторождения приурочены к разломам северо-западного простирания в раннекембрийском кристаллическом фундаменте Алдано-Станового щита и являются наиболее крупным резервом урана в России [1]. Различаются три минералогических типа оруденения: Au браннеритовое, Au уранинитовое и браннерит – Au-Ag. Эндогенные ореолы Эльконского рудного узла характеризуются устойчивой ассоциацией типоморфных элементов Ag-V-As-Tl-Au [2].

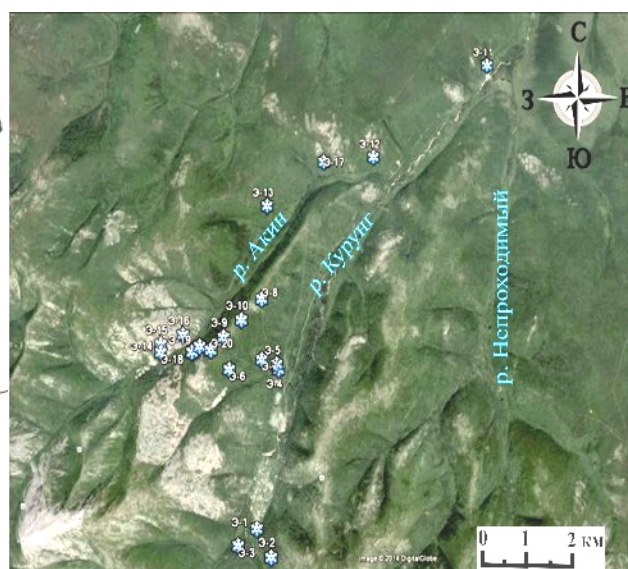


Рис. 1. Участок геохимического опробования снега

Геоморфологически Эльконское поднятие представляет четко выраженный свод-горст фундамента со ступенчато-блоковым рельефом и осевым грабенom (долиной р. Холодной) в средней части, с окаймляющими пологими тектоническими блоками древней части Алданского докембрийского пенеплена. В современном рельефе выровненные участки водораздельных поверхностей проявляются в ряде ярусов разной высоты. Одной из основных особенностей природных условий Эльконского горста является существенная неоднородность геоэкологических условий, что в первую очередь, связано с геоморфологическим строением [3].

Мерзлотные ландшафты представлены высотно-поясными типами: горно-таежными, горными редколесьями и горно-тундровыми. Перепад высот точек отбора снега составляет от 409 до 908 м (рис. 1).

Район исследований находится в III климатическом поясе (умеренная циркуляция) в континентальной Восточно-сибирской климатической области. Основное влияние на формирование климата района в зимний период оказывает отрог барического азиатского антициклона, обусловленный вторжением с арктических областей холодных воздушных масс.

Результаты и обсуждение

Средняя температура воздуха составила в период наблюдений $-31,4^{\circ}\text{C}$, температура снега на поверхности почвы в среднем равнялась $-4,8^{\circ}\text{C}$ и колебалась в пределах $-0,6 \dots -11,0^{\circ}\text{C}$ (табл. 1).

Таблица 1

Средние значения температуры снега

Мерзлотные ландшафты	Абс. отм., м	Снег, $^{\circ}\text{C}$	
		на поверхности	на почве
Горно-таежные	400–600	$-5,2$	$-2,5$
Горные редколесья	600–800	$-6,2$	$-4,0$
Горные тундры	800–1000	$-7,9$	$-4,9$
Среднее		$-6,0$	$-4,8$

Наблюдаются некоторые особенности залегания снега, связанные с ландшафтной поясностью. Мощность снежного покрова возрастает с повышением высотности рельефа (рис. 2) с 80 см в горно-таежных ландшафтах до 99–103 см в расположенных выше ландшафтах редколесий и тундр.

Характерной особенностью снежного покрова региона является высокая плотность. К началу снеготаяния его плотность колеблется от $0,202 \text{ г/см}^3$ на высотах 400–600 м до $0,258 \text{--} 0,281 \text{ г/см}^3$ в горных ландшафтах (рис. 2), почти в два раза выше ($0,138 \text{--} 0,154 \text{ г/см}^3$), чем в горных ландшафтах Восточной Якутии [4].

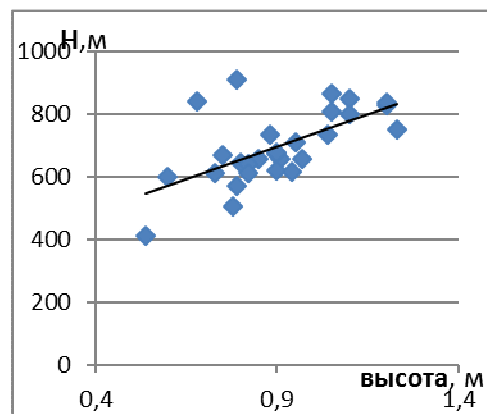


Рис. 2. Зависимость мощности снежного покрова от высотности рельефа

Концентрация пылевых частиц в снежном покрове изменяется в пределах $0,005 \text{--} 0,110 \text{ г/л}$. Характерно, что запыленность снега в горных ландшафтах Эльконского горста, где часто встречаются выходы бесснежных гольцов, примерно на порядок выше, чем в горных ландшафтах Восточной Якутии [4]. Концентрация пыли максимальна в ландшафтах горных пустынь $0,062 \text{--} 0,110$, в среднем $0,074 \text{ г/л}$, и понижается до $0,010 \text{ г/л}$ в среднетаежных ландшафтах на высотах 400–600 м (рис. 3).

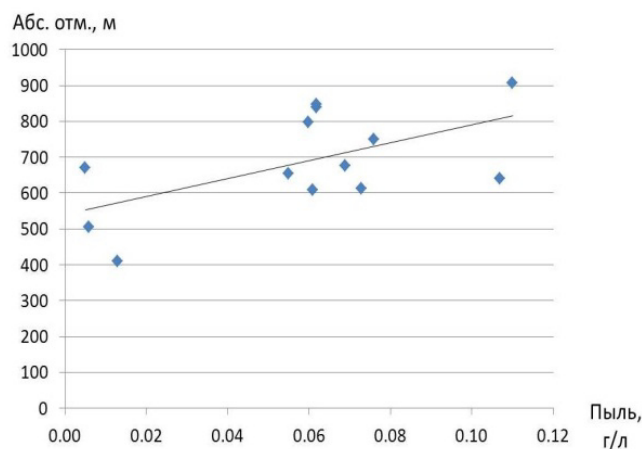
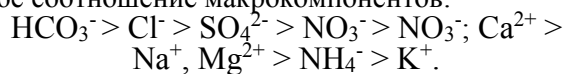


Рис. 3. Изменение запыленности снежного покрова с высотой

Снеговая вода в районе исследований гидрокарбонатно-кальциевая ультрапресная, с диапазоном изменения минерализации в пределах порядка $8,0 \text{--} 14,8 \text{ мг/л}$.

Для снежного покрова всех типов горных мерзлотных ландшафтов характерно идентичное соотношение макрокомпонентов:



По соотношению главных ионов химический состав снежного покрова типичен для горных

районов и подчиняется общей гидрохимической закономерности, в соответствии с которой, первым анионом пресных и ультрапресных вод является HCO_3^- . Содержание гидрокарбонатов изменяется от 7,9 до 10,9 мг/л. В катионном составе основным ионом является кальций (1,1–3,1 мг/л). Преобладающее влияние на процессы формирования химического состава снежного покрова в горных мерзлотных ландшафтах оказывают соли континентального происхождения. Об этом свидетельствует высокое содержание гидрокарбонатов кальция (40–74 %-экв.). Соли морского происхождения составляют в среднем всего 15% от общего количества солей в снеге.

Относительное содержание сульфат-иона в снежном покрове не превышает 9 %-экв. (0,58–1,07 мг/л), что отражает существующий в настоящее время низкий уровень техногенного давления в регионе.

Величина pH в снежном покрове всех типов высотных ландшафтов колеблется в пределах 5,17–5,57, что отвечает фоновым атмосферным осадкам. В загрязненных техногенных районах Якутии для снега характерны щелочные значения pH [5].

Корреляционный анализ показывает, что увеличение минерализации снежного покрова коррелирует с повышением высотных отметок ($r=0,7$) и определяется возрастанием концентрации ионов кальция, сульфатов, калия и, в меньшей степени, хлоридов (рис. 4).

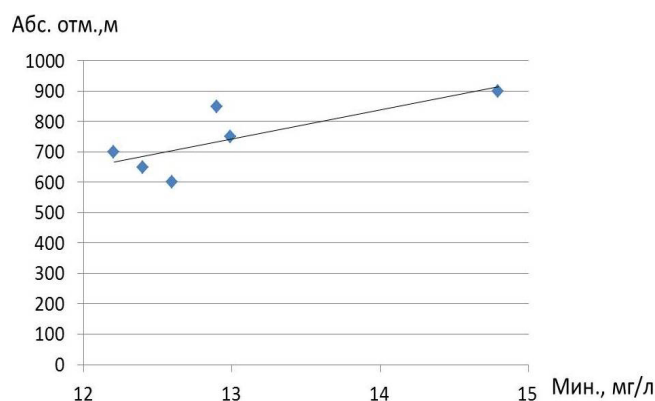


Рис. 4. Зависимость величины минерализации снега от высоты

Среднее содержание микрокомпонентов в снежном покрове колеблется от <0,005 (Li, Sr, Ba) до 102 (HPO_4^{2-}) мкг/л. В порядке убывания концентрации микроэлементы группируются в следующий ряд:

$\text{P} > \text{Mn} > \text{Cu}, \text{F} > \text{Ba}, \text{Sr}, \text{Li} (\text{As})^*$.

*В большинстве проб содержание Ba, Sr, Li и As ниже чувствительности анализа: Ba, Sr, Li (<0,5), As (<5) мкг/л.

Как и для макрокомпонентов, распределение микроэлементов в снежном покрове отклоняется от высотной зональности, в соответствии с которой с высотой должна понижаться их концентрация. Максимальное содержание F, Sr и тяжелых металлов (Mn и Cu) наблюдается в ландшафтах горных редколесий и горных тундр с абсолютными отметками в интервале высот 600 – 1000 м (табл. 2).

Таблица 2
Содержание микроэлементов в снежном покрове мерзлотных ландшафтов Эльконского горста

Тип ландшафта (абс. отм., м)	pH	H^{3+} , TE	Среднее содержание, мкг/л			
			Mn	Cu	As	P
Горно-таежные (400–600)	5,27	13	7,0	5,0	<1	0,022
Горные редколесья (600–800)	5,34	19	8,9	4,5	<1	0,016
Горные тундры (800–1000)	5,36	31	12,2	8,2	<1 – 94	0,012

Рассчитан объём (плотность) накопления химических компонентов в снежном покрове – Q, т/км², по формуле:

$$Q = 10^{-2} \cdot c \cdot P \text{ [6]},$$

где c – концентрация компонента, мг/л и P – влагозапас, мм.

Суммарное поступление растворимых и нерастворимых форм компонентов в снежный покров возрастает с высотой и колеблется от 32 т/км² в горно-таежных ландшафтах до 44 т/км² в более высокогорных ландшафтах горных тундр. Во всех типах горных ландшафтов наблюдается преобладание растворимых (ионных) форм над пылевыми, в соотношении 6:1 (табл. 3), что свидетельствует об удаленности района от источников загрязнения.

Таблица 3
Плотность поступления растворимых и нерастворимых форм

Формы вещества в снежном покрове	Типы мерзлотных ландшафтов, абс. отм., м		
	горно-таежные, 400–600	горные редколесья, 600–800	горные тундры, 800–1000
Пыль, т/км ² (%)	5,1 (16)	5,8 (15)	6,0 (14)
Сумма ионов, т/км ² (%)	26,8 (84)	33,6 (85)	38,4 (86)
Всего, т/км ²	31,9	39,4	44,4

Градиент плотности поступления на земную поверхность растворимых и нерастворимых форм вещества в снежный покров уменьшается с 3,8 т/км² на высотах от 500 до 700 м до 2,5 т/км² в интервале 700–900 м и составляет в среднем около 3,1 т/км²/100 м.

В распределении плотности поступления компонентов в снежный покров четко выражены элементы обратной гидрохимической зональности в формировании осадков, т. е. наряду с зональными факторами очень большая роль принадлежит факторам азональным (табл. 4).

Таблица 4
Изменение плотности поступления компонентов с высотой, т/км²

Компоненты	Абс. отм., м			
	600	700	800	900
Минерализация	23,1	29,6	30,9	44,2
N	0,75	0,74	0,48	0,78
S	0,45	0,52	0,58	1,07
C	4,00	4,94	5,76	6,88
P	0,068	0,066	0,022	0,005
Mn	0,024	0,020	0,025	0,057
Cu	0,022	0,014	0,009	0,039
Cl ⁻	2,83	3,12	1,82	4,24
Пыль	5,08	5,17	5,75	9,17

Экспериментальными и натурными исследованиями, проведенными ранее, установлены особенности миграции химических элементов в системе снежный покров – подстилающий субстрат, периодически меняющей направление в течение холодного времени года [6]. В пределах активных тектонических нарушений, рудных зон и районов техногенного воздействия, т.е. на участках высокой геохимической неоднородности горных пород (грунтов) за счет миграции химических элементов из подстилающего субстрата в снежный покров, в подошвенных слоях снега наблюдается максимальная концентрация химических элементов [5].

Отклонение от высотной зональности распределения химических элементов в снежном покрове (S, C, Mn, Cu, H³⁺) связано с миграцией макро- и микроэлементов из подстилающего субстрата в снег в ландшафтах горных редколесий и горных тундр, где распространены аномалии элементов типоморфных для рудных тел и эндогенных ореолов рассеяния гидротермальных Au-U месторождений (рис. 5).

Зависимость между концентрацией микроэлементов в снежном покрове и литохимических аномалиях приведена на рис. 6.

Отсутствие горных работ на территории Эльконского горста в зимнее время и удаленность от промышленных объектов определяют чисто-

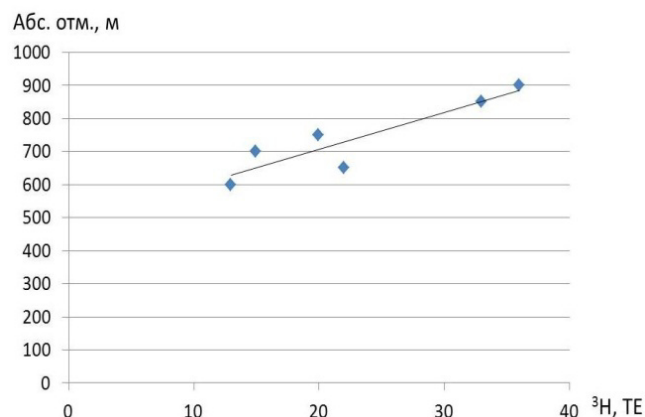


Рис. 5. Зависимость концентрации трития в снежном покрове от высоты

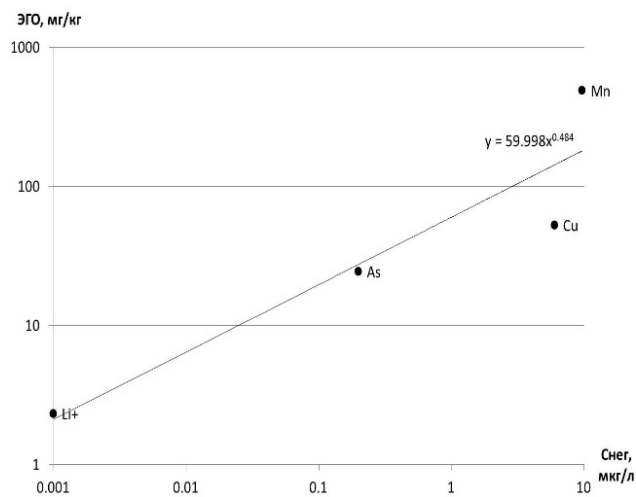


Рис. 6. Соотношение концентрации микроэлементов в снежном покрове и эндогенных геохимических ореолах

ту атмосферы и снега. Концентрация большинства химических компонентов в снежном покрове значительно ниже экологических норм для природных вод: на один (Li, NO₂⁻, NO₃⁻), два (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Sr²⁺) и даже три (Cl⁻, Ba, SO₄²⁻, Na⁺) порядка. В то же время положение района исследований на территории специфического металлогенического района определяет миграцию в снег из подстилающего субстрата ряда химических элементов типоморфных для рудных тел. Концентрация некоторых рудных микроэлементов в снежном покрове превышает санитарные нормы для рыбохозяйственного использования поверхностных вод [7] и достигает экологически неблагоприятных значений (в скобках уровень превышения над ПДК_{рыбохоз}):

Cu(13)>Mn,As(1,9)>NH₄⁺(1,2)>Li(0,8)>NO₂⁻, NO₃⁻(0,1)>Ca²⁺,Mg²⁺,K⁺,Sr²⁺(0,0n)>Cl⁻,Ba,SO₄²⁻, Na⁺(0,00n).

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/км² в горно-таёжных ландшафтах до 44 т/км² 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, H³⁺) 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