

Геохимическая характеристика техногенных отложений (культурного слоя) в криолитозоне

В.Н. Макаров, Н.В. Торговкин

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия
e-mail: makarov@mpi.ysn.ru, nikolajj-torgovkin@rambler.ru*

Аннотация. Показаны геохимические особенности техногенных отложений (культурного слоя) урбанизированной территории в криолитозоне на примере сформировавшихся в результате более чем 300-летнего существования г. Якутска. Наличие многолетнемерзлых пород определило геодинамическую и геохимическую устойчивость толщи техногенных осадков, различающихся своим химическим и минеральным составом, строением, физико-механическими свойствами, особенностями миграции и концентрации химических элементов. Показано, что возникновение аномальных концентраций микроэлементов в городских грунтах определяется техногенными процессами и особенностями химического состава аллювиальных четвертичных отложений. Техногенное засоление и контрастные аномалии токсичных элементов в старых районах города охватывают грунты культурного слоя и проникают в верхние горизонты аллювиальных отложений. Мощность техногенных геохимических ореолов в культурном слое зависит от возраста освоения городской территории и достигает 8–10 м.

Ключевые слова: урбанизация, криолитозона, геохимия, техногенез, культурный слой.

Geochemical Characteristics of Technogenic Deposits (Cultural Layer) in the Permafrost Zone

V.N. Makarov, N.V. Torgovkin

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Merzlotnaya Str., Yakutsk, 677010, Russia
e-mail: makarov@mpi.ysn.ru, nikolajj-torgovkin@rambler.ru*

Abstract. The geochemical characteristics of anthropogenic deposits (the cultural layer) of the urbanized area in the permafrost zone are shown on the example of the city of Yakutsk which was founded more than three hundred years ago. The presence of permafrost determined geodynamic and geochemical stability of the thickness of the anthropogenic precipitations, which differ in their chemical and mineral composition, structure, physical and mechanical properties, characteristics of migration and concentration of chemical elements. It is shown that the occurrence of anomalous concentrations of trace elements in the urban soils is determined by technological processes and peculiarities of chemical composition of the alluvial Quaternary deposits. Technogenic salinization and contrasting anomalies of toxic elements in the older parts of the city cover the soils of the cultural layer and penetrate into the upper layers of the alluvial sediments. The thickness of technogenic geochemical halos in the cultural layer depends on the age of the development of the urban area and reaches 8–10 m.

Key words: urbanization, permafrost, geochemistry, technogenesis, cultural layer.

Геологическая деятельность человека привела к созданию нового вида пород – техногенных отложений (культурного слоя). Формирование техногенных отложений связано с природными условиями местности, геологическими и геохимическими процессами, с историей развития

города и характером хозяйственной деятельности человека.

Исследование техногенных отложений урбанизированных территорий в криолитозоне – специфического природно-техногенного слоя является весьма актуальной научной и практической задачей.

Впервые характеристика культурного слоя в криолитозоне была дана Н.И. Салтыковым в статье «О фундаментах зданий г. Якутска».

МАКАРОВ Владимир Николаевич – д.г.-м.н., проф., г.н.с.; ТОРГОВКИН Николай Владимирович – м.н.с.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ (КУЛЬТУРНОГО СЛОЯ)

Мощность этого слоя, состоящего «...из перегной, строительного мусора и отходов, накопившихся в течение трехсотлетнего существования города и перемешавшихся с естественным пылевато-суглинистым покровом, ... меняется в связи с возрастом отдельных участков города. Наибольшей величины (до 1,50–1,75 м) она достигает в районе ... заселенном уже в конце XVII в.» [11, с. 102]. Материал рассматриваемого слоя «...обладает высокой влажностью, достигающей 150–200 и более процентов. Переувлажненные грунты встречаются ... и в вечной мерзлоте. Это вполне понятно, так как поверхность вечной мерзлоты поднималась по мере накопления «культурного» слоя и постепенно захватывала влагу, скопившуюся у границы протаивания. Встречаются линзы льда, толщиной до 10–20 см, видимо, образовавшиеся во время пучения при замерзании деятельного слоя». Интересно, что «... в «культурном» слое, обильном перегноем, надмерзлотные воды города содержат в значительном количестве примеси Cl, SO₄ и другие и иногда остаются в жидком состоянии до температуры минус 3°–4°» [11, с. 103].

Техногенные отложения в Якутске – «культурные» наслоения города многокомпонентны. Это природные аллювиальные образования, перемещенные при городском строительстве и отходы различного происхождения – производственные и строительные отходы, обычный бытовой мусор и т. п. Характерными для культурного слоя центральных улиц города являются захороненные остатки торцовой мостовой из деревянных листовых чурбаков, положенных на слой привозного песка толщиной около 0,5 м.

Условия формирования культурного слоя на территории г. Якутска очень специфичны, это арена ежегодного проявления процессов сезонного промерзания и оттаивания грунтов, замерзания и оттаивания грунтовых вод. Поскольку глубина сезонного оттаивания часто меньше мощности культурного слоя грунтов, образова-

ние грунтового льда (лед–цемент, ледяные прослойки, линзы, жилы) является неотъемлемой частью строения техногенных отложений.

За последние 30–40 лет на фоне относительной стабильности температуры многолетнемерзлых грунтов в естественных ландшафтах, сохранившихся на окраинах г. Якутска, в центральной части города их температура сильно изменилась. Изменения температурного поля грунтов в основном носят односторонний характер в сторону повышения [3]. Нижняя граница слоя годовых теплооборотов на территории г. Якутска фиксируется на глубинах 10–12 м и иногда понижается до 15–16 м.

При анализе фактического материала, полученного в ходе геокриологического мониторинга, проведенного в 2010–2012 гг. ИМЗ СО РАН, установлено возрастание мощности сезонного слоя (СТС) на территории г. Якутска. В период с середины XX по начало XXI века (1963–2011 гг.) мощность СТС на территории города в среднем увеличилась на 60–65 см. В старых районах с продолжительностью техногенного воздействия 150–350 лет мощность СТС возросла на 0,84–1,07 м. В «новых» районах с возрастом застройки менее 50 лет характер СТС практически не изменился (табл. 1).

Наблюдается зависимость возрастания мощности СТС в период интенсивного развития городской инфраструктуры (середина XX – начало XXI века) от численности жителей административных районов г. Якутска, т.е. фактически от интенсивности техногенного давления (рис. 1).

Наличие многолетнемерзлых пород определяет геодинамическую и геохимическую устойчивость толщи техногенных осадков, различающихся своим химическим и минеральным составом, строением, физико-механическими свойствами и особенностью миграции химических элементов.

Показательный пример сформировавшегося культурного слоя (КС) – уровень современной

Таблица 1

Изменение мощности СТС в районах города с различным временем техногенеза, м [6]

Параметры	Период техногенного воздействия на территории города, лет								г. Якутск, среднее		
	350		250		150		50				
	1963 г.	2011 г.	1963 г.	2011 г.	1963 г.	2011 г.	1963 г.	2011 г.	1963 г.	2011 г.	
Минимум	1,10	1,63	1,13	1,96	1,10	2,25	1,20	1,53	1,10	1,53	
Максимум	1,82	2,92	2,10	3,73	1,90	2,89	2,10	>10	2,10	>10	
Среднее	1,42	2,38	1,75	2,59	1,40	2,59	1,84	1,91	1,66	2,30	
Изменение мощности СТС	м		+0,96		+0,84		+1,04		+0,07		+0,64
	%		+68		+48		+74		+4		+30
Тренд, м/год		0,023		0,020		0,025		0,002		0,015	
Кол-во скважин	4		5		3		7		19		

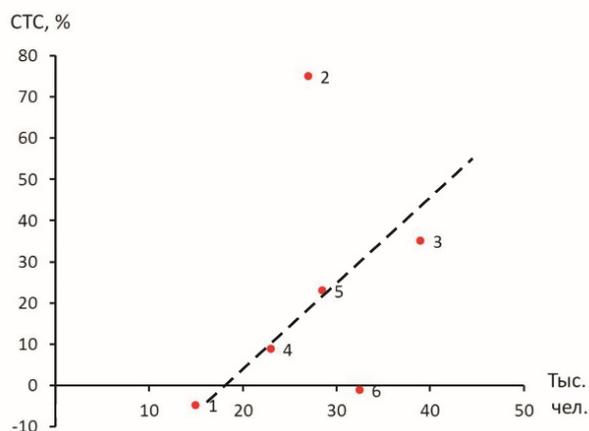


Рис. 1. Зависимость изменения мощности СТС от численности жителей административных районов г. Якутска (середина XX – начало XXI века).

Административный район: 1 – Автодорожный; 2 – Губинский; 3 – Октябрьский; 4 – Сайсарский; 5 – Строительный; 6 – Центральный

поверхности в старой части г. Якутска, который нередко оказывается расположенным гораздо выше оснований цокольных этажей многих зданий. Визуально кажется, что строения «вросли» в грунт. На самом же деле, это вокруг них «вырос» культурный слой.

Мощность КС в г. Якутске изменяется от центра города к окраинам. Средняя мощность отложений в старых районах города около 4 м, а в «молодых» на окраинах менее – 2,5 м (рис. 2).

На протяжении 300 лет до середины 50-х годов XX века г. Якутск представлял собой, по существу, большую деревню и формирование культурного слоя, состоящего из перегноя, строительного мусора и отходов, определялось содержанием на его территории большого числа лошадей и коров, печным отоплением, отсутствием канализации, что отразилось на накоплении органики в КС.

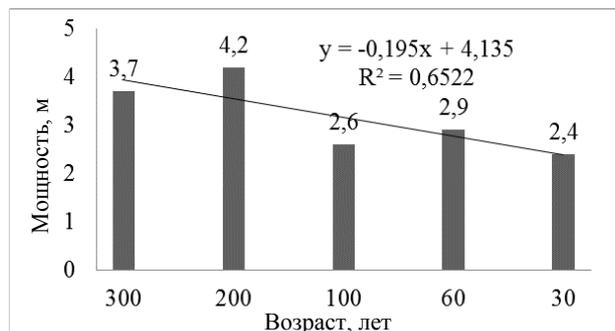


Рис. 2. Зависимость мощности культурного слоя от продолжительности техногенного воздействия

В мерзлотных условиях и анаэробной среде при отсутствии кислорода органическое вещество в культурном слое очень хорошо сохраняется (выгребные ямы, навоз). Специфический гнилостный запах чувствуется при оттаивании мерзлых грунтов культурного слоя обычно на глубине 2–4 м, иногда до 6–8 м. Навоз является существенной составляющей культурного слоя г. Якутска и накапливался на его территории со дня основания на протяжении почти 300 лет. И только с середины XX века из-за изменения хозяйственной жизни города (пуск городского канализационного коллектора, замена лошадей автомобилями, прекращение выпаса скота и др.) навоз перестает поступать в городские грунты и изменяется химический состав культурного слоя, что хорошо заметно по резкому понижению концентрации соединений азота в «молодых» грунтах (табл. 2).

Глубина распространения аномального количества азота (>0,010 мг·экв.) в грунты увеличивается с повышением возраста городской застройки: если в грунтах 50-летней застройки города она составляет не более 3 м, то в 100-летней – уже около 6,5 м, а в наиболее старых 200–300-летнего возраста – до 8,5 м (табл. 3).



Якутск, ул. Хабарова, 44

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ (КУЛЬТУРНОГО СЛОЯ)

Т а б л и ц а 2

Содержание азота в разновозрастных грунтах, мг·экв.

Глубина, м	300 лет	100 лет	50 лет
	скв. 3	скв. 14	скв. 4
1	0,010	0,008	0,008
2	0,015	0,010	0,006
3	0,016	0,060	0,015
4	0,032	0,009	0,005
5	0,117	0,011	0,004
6	0,079	0,042	0,005
7	0,152	0,009	0,005
8	0,047	0,007	0,004
9	0,007	0,009	0,007

Примечание. Сумма NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺ в пересчете на N.

Т а б л и ц а 3

Глубина проникновения соединений азота в грунты г. Якутска, м

Соединения азота	Возраст культурного слоя, лет				
	300	200	100	70	<50
NH ₄ ⁺	8,5	5,5	7,0	1,5	6,5
NO ₂ ⁻	6,5	6,5	6,5	8,5	1,5
NO ₃ ⁻	10,0	10,0	5,5	3,5	6,5
Σ N	8,3	7,3	6,3	4,5	4,8

Интенсивность накопления в грунтах аномального количества соединений азота уменьшается в ряду: NO₃⁻ > NH₄⁺ > NO₂⁻. Культурный слой отличается высоким содержанием фосфатов, натрия, калия, кальция, магния. Высокие концентрации фосфатов связаны в основном с процессами разложения органического вещества, бытовых отходов. Концентрация фосфатов в грунтах КС максимальна в его верхней части в пределах распространения сезонно-талых грунтов – 850–1125 мг/кг и понижается до 775–925 мг/кг в многолетнемерзлых слоях КС. В нижележащих многолетнемерзлых аллювиальных отложениях содержание фосфатов снижается ещё больше – до 625 мг/кг. В «старых» грунтах КС с возрастом 100–350 лет глубина распространения аномальных концентраций фосфатов практически одинакова, в пределах 5–6 м, уменьшается в 70-летних грунтах до 2–4 м, а в городских районах современной застройки аномалий фосфатов не наблюдается.

Кальций и магний поступают в грунты культурного слоя обычно из различного строительного материала (известняка, строительного раствора, цемента, бетона). Биофильные элементы (калий и натрий) накапливаются вследствие разложения органического вещества, в основном древесины, а, кроме того, источником калия является зола. Максимальное содержание калия

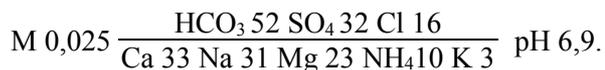
0,2–0,6 мг·экв. приурочено к грунтам КС в зоне распространения сезонно-талых грунтов с максимальной продолжительностью техногенного воздействия (более 200 лет).

Для аллювиальных многолетнемерзлых отложений характерна слабокислая реакция среды, в среднем pH=6,81. Слабокислая, близкая к нейтральной, величина pH сохраняется в мерзлых грунтах КС в интервале глубин 3–6 м. Реакция среды вышележащих сезонно-талых грунтов КС изменяется на слабощелочную в интервалах pH=7,18–7,73.

Сведениям о накоплении микроэлементов в культурном слое посвящен ряд работ по крупным городам, где особое внимание уделяется токсичным тяжелым металлам – Pb, Cd, As, Hg [1, 4, 7, 9, 10, 12]. Однако в литературе практически отсутствуют данные о геохимических особенностях КС городов, расположенных в криолитозоне. Накопление микроэлементов в техногенных городских отложениях (КС) может быть связано не только с деятельностью человека, но и с высоким содержанием элементов в естественных горных породах, на которых сформировался КС.

Современные (голоценовые) аллювиальные отложения в долине р. Лены представляют собой почвообразующий субстрат, являются исходным поставщиком продуктов гипергенного выветривания и имеют исключительное значение для формирования современного элювия и почв. Геологические (т.е. природные) аллювиальные отложения четвертичного возраста во многом определили минералогический и химический состав КС.

Химический состав аллювиальных отложений (среднее содержание в интервале глубин 10–20 м) в районе г. Якутска и сравнение с кларком земной коры (КЗК) приведены в табл. 4. По химическому составу аллювиальные отложения слабокислые, близкие к нейтральным (pH=6,81), слабоминерализованные – соленость 0,025%, сульфатно-гидрокарбонатные, смешанные по катионам, с относительно высоким содержанием аммония:



Результаты сравнительного анализа с КЗК показывают, что аллювиальные четвертичные отложения в районе города геохимически специализированы на группу лито- и халькофильных элементов – В, W, Pb, Ti, Sn, Mo и Ag, содержание которых превышает кларковые значения в 1,2–2 раза (табл. 5). Тяготеют к ним Р и Ge, количественно близкие к кларковым.

Сравнение концентрации микроэлементов в аллювиальных отложениях с кларком земной коры, мг/кг (Hg, мг/т)

Химические элементы	Q _{al}	КЗК*	Q _{al} /КЗК	Химические элементы	Q _{al}	КЗК*	Q _{al} /КЗК
Li	22	32	0,7	Ge	1,2	1,4	0,9
Be	1	3,8	0,3	As	0,96	1,7	0,6
B	21	12	1,8	Y	17	20	0,8
P	800	930	0,9	Nb	15	20	0,8
Sc	10	10	1	Mo	1,6	1,1	1,4
Ti	5000	4500	1,1	Ag	0,08	0,07	1,1
V	36	90	0,4	Cd	0,65	0,13	5,0
Cr	59	83	0,7	Sn	2,7	2,5	1,1
Mn	550	1000	0,6	Yb	0,80	0,33	2,4
Co	6	18	0,3	W	2	1,3	1,5
Ni	24	58	0,4	La	1,8	29	0,1
Cu	20	47	0,4	Pb	24	16	1,1,5
Zn	65	83	0,8	Bi	1	0,009	100
Ga	14	19	0,7	Hg	30	83	0,4

Примечание. КЗК* – по [2]; кол-во скважин – 71.

Коэффициент концентрации химических элементов в аллювиальных и техногенных отложениях в районе г. Якутска [5, 6, 8]

Аллювиальные отложения	Коэффициент концентрации (относительно КЗК)					n
	<0,5	0,7–1,0	1,0–1,5	1,5–2,0	>2,0	
V, Co, Ni, Cu, La, Be, Hg	P, Cr, Mn, Y Zn, Ga, Ge, Nb, Yb, Sc, Li	Ti, Mo, Sn, Ag	B, Pb, W	–	190	

Наблюдается существенная разубоженность песчано-глинистых и песчаных пород аллювия такими элементами, как V, Co, Ni, Cu, La, Be и Hg, содержание которых фиксируется на уровне значений $0,5 < \text{КЗК}$. Выделяется группа химических элементов, преимущественно литофильных, концентрация которых, хотя и возрастает в техногенных отложениях, но остается на уровне отрицательной аномалии по отношению к КЗК: V, Co, Cr, Ni, Cu, Ga.

Максимальная геохимическая трансформация отмечается в верхнем слое городских почв (0–0,2 м), где в процессе антропогенного воздействия существенно возросла контрастность, по сравнению с уровнем КЗК, группы халькофильных (Hg, Zn, Pb, Ag, Tl) и некоторых литофильных (B, Mn, Y) химических элементов (табл. 5).

В результате более чем 300-летнего освоения городской территории в г. Якутске сформировалась локальная биотехносфера. Однако формирование современных техногенных отложений (КС) на территории города началось с середины 50-х годов XX века, когда изменился характер его хозяйственной жизни. Геохимическая характеристика КС получена в результате многолетнего литохимического мониторинга «городских почв» и изучения керн буровых скважин. Буровые профили пройдены в районах города с различным временем освоения, от современных, возраст которых менее 50 лет, до древних 300–

350-летних. Их сопоставление позволяет судить о химическом составе КС в каждой из 5 выделенных областей урбанизации, которые различаются возрастом городской застройки, а, следовательно, и техногенным воздействием (рис. 3).



Рис. 3. Возраст городской застройки г. Якутска (составлен по планам и картам города с XVIII в. и по настоящее время)

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ (КУЛЬТУРНОГО СЛОЯ)

Таблица 6

Соотношение концентрации химических элементов и соединений в техногенных и аллювиальных отложениях

Контрастность техногенных геохимических аномалий по отношению к Q _{al}					
>10	5–10	3–5	2–3	1,5–2	~1
Cl, NO ₃ , K, Na, NO ₂	SAL, Hg, S	Mg, Ag, C, Ca	Li, V, Co, Zn, W, Pb	P, Cr, Ni, Cu, Ge, NH ₄ , Sn	Ti, Mn, Ga, Y, Mo, pH, Bi, Nb, B

Таблица 7

Зависимость мощности техногенных ореолов от возраста освоения городской территории

Возраст освоения	Мощность техногенных ореолов, м					
	10–8	8–6	6–5	5–3	3–2	2–1
300	Hg, NO ₃ , NH ₄	Sal, Na, S, Cl, NO ₂	Ca, Mg, C, Ti, V, Mn, Co, Zn, Y	Ag, Ni, Sn, Cu	P, Cr, Ge, B, K	Pb, Mo
200	Hg, NO ₃	Zn, NO ₂	Mo, Ag, Sn, NH ₄	Ti, V, Cr, Sal, Na, S, Cl, Ca, Mg, C, K	Li, Co, Cu, Y	Ga, Pb
100	Zn	C, NH ₄ , Ag, Co, NO ₂	Cl, P, Ti, NO ₃	Ca, Na, V, Sal, S, Mg, Li, Mo, Hg	Mn, Cr, Ni, Zn, Ag	Co, Cu, Pb
≤70	-	NO ₂	Ti, NO ₃	Mn, Co, Pb	Cl, Sal, Na, S, Cl, Ca, Mg, C, Ni	P, V, Cr, Cu, Zn, Ga, Ge, Ag, Sn, Hg, NH ₄

Соотношение среднего содержания микроэлементов в разновозрастных грунтах КС на территории г. Якутска и в аллювиальных отложениях – контрастность техногенных геохимических аномалий показано в табл. 6.

Максимальная контрастность техногенных геохимических аномалий по отношению к химическому составу аллювиальных отложений (>5) свойственна макрокомпонентам солевого состава грунтов культурного слоя: Cl⁻, NO₃⁻, K⁺, Na⁺, NO₂⁻, SO₄²⁻, а также литохимическим аномалиям ртути.

Техногенные геохимические аномалии в сезонно-талых (КС_{СТС}) и многолетнемерзлых (КС_{ММП}) грунтах культурного слоя различаются по уровню концентрации химических компонентов. Контрастность аномалий в грунтах КС по отношению к уровню содержания в аллювиальных отложениях изменяется в КС_{СТС} от 1,09 (рН) до 7,18 (Hg) и в среднем составляет 3,05, а в КС_{ММП} – 1,01 (Mn) – 5,43 (Cl⁻), в среднем – 2,10.

Наибольшая контрастность миграции в СТС/ММП КС характерна для ртути, содержание которой в КС_{ММП} понижается в 5 раз по сравнению с КС_{СТС}, что можно объяснить уменьшением миграционной способности Hg при понижении температуры грунтов.

Наблюдается зависимость мощности техногенных геохимических ореолов в КС от возраста освоения городской территории (табл. 7).

На мерзлотно-геохимическом разрезе техногенных отложений КС г. Якутска (рис. 4) показан характер трансформации солевого состава и

спектра аномальных микроэлементов в аллювиальных отложениях, сезонно-талых и мерзлых грунтах КС.

Выводы

Впервые проведено геохимическое изучение техногенных отложений КС урбанизированной территории в криолитозоне – специфического природно-техногенного слоя, изучение которого является весьма актуальной научной и практической задачей. В результате более чем 300-летнего освоения городской территории в г. Якутске сформировалась локальная биотехносфера.

Формирование литологических и геохимических параметров культурного слоя в г. Якутске происходило в два исторических этапа: первого – на протяжении 300 лет со дня освоения и до середины 50-х годов XX века «деревенского» и второго, когда на протяжении последних 60–70 лет сформировалась сильно урбанизированная территория. Мерзлотные процессы определяют специфические условия формирования культурного слоя на территории г. Якутска. Наличие многолетнемерзлых пород определяет геодинамическую и геохимическую устойчивость толщи техногенных осадков, различающихся своим химическим и минеральным составом, строением, физико-механическими свойствами и особенностью миграции химических элементов.

Накопление микроэлементов в техногенных городских грунтах связано с высоким

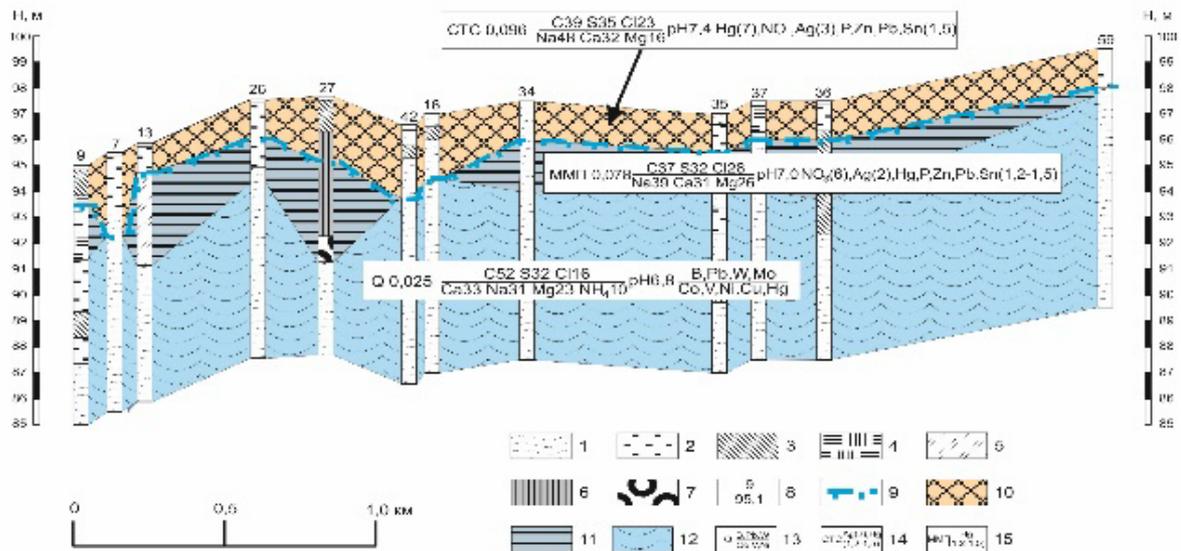
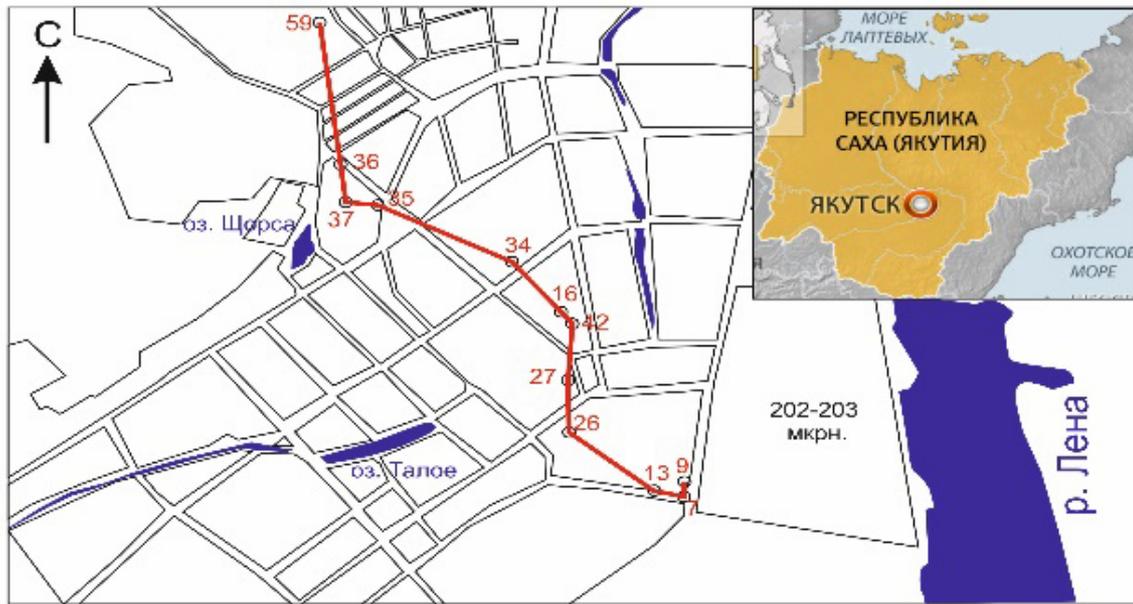


Рис. 4. Мерзотно-геохимический разрез техногенных отложений (культурного слоя): 1 – песок; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – торф; 5 – лед; 6 – железобетон; 7 – дерево; 8 – номер скважины и абсолютная отметка устья; 9 – кровля ММП; 10–11 – техногенные отложения: 10 – сезонно-талые, 11 – мерзлые; 12 – мерзлый аллювий; 13–15 – геохимическая характеристика: 13 – химический состав и микроэлементы в аллювиальных отложениях: накапливающиеся (в числителе) и дефицитные (в знаменателе), 14–15 – химический состав и аномальные микроэлементы в техногенных отложениях (14 – сезонно-талых и 15 – мерзлых)

содержанием в аллювиальных четвертичных отложениях W, B, Pb, Ti, Sn, Mo и Ag, и их дефицитом на V, Co, Ni, Cu, La, Be и Hg, содержание которых фиксируется на уровне значений $0,5 < КЗК$.

Максимальная контрастность техногенных геохимических аномалий по отношению к химическому составу аллювиальных отложений

(>5) свойственна макрокомпонентам – Cl⁻, NO₃⁻, K⁺, Na⁺, NO₂⁻, SO₄²⁻ и Hg. Содержание микроэлементов в сезонно-талых примерно в 1,5 раз выше, чем в многолетнемерзлых грунтах КС.

Техногенное засоление и контрастные аномалии токсичных элементов в старых районах города охватывают грунты КС и проникают в верхние горизонты аллювиальных отложений.

Мощность техногенных геохимических ореолов в КС зависит от возраста освоения городской территории и достигает 8–10 м.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-45-05050 р_восток_a.

Литература

1. *Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация* / М. И. Герасимова [и др.]. М.: Ойкумена, 2003. 270 с.
2. *Виноградов А. П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // *Геохимия*. 1962. № 2. С. 555–572.
3. *Дорофеев И.В.* Вековые изменения температуры многолетнемерзлых грунтов в Якутске / И.В. Дорофеев, И.И. Сыромятников // *Вопросы географии Якутии*. Вып. 11. Влияние изменений климата на природные процессы криолитозоны. Якутск, 2013. С. 103–108.
4. *Каздым А.А.* Культурный слой как один из видов техногенного литогенеза и его литогеохимические особенности // *Минералогия техногенеза*. Миасс: ИМин. УрО РАН, 2002. С. 226–247.
5. *Макаров В.Н.* Геохимический атлас Якутска. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1985. 64 с.
6. *Макаров В.Н.* Экогеохимия городских озер Якутска / В.Н. Макаров, А.Л. Седельникова. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2016. 210 с.
7. *Нежданова И.К., Суетин Ю.П., Свешиников Г.Б.* Об изучении загрязненности городских почв в связи с охраной окружающей среды // *Вестник ЛГУ*. 1984. № 12. С. 87–91.
8. *Подъячев Б.П.* Геохимические аномалии благородных металлов в осадочных отложениях Якутского поднятия // *Система коренной источник–россыпь*. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009. С. 166–173.
9. *Почва, город, экология* / Под ред. Г.В.Добровольского. М.: Фонд за экономическую грамотность, 1997. 310 с.
10. *Садовникова Л.К.* Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами // *Биологические науки*. 1989. № 9. С. 47–52.
11. *Салтыков Н. И.* О фундаментах зданий г. Якутска // *Труды Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева*. Т. 1. Жилищное и мелкопромышленное строительство в районах распространения вечной мерзлоты. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946. С. 102–136.
12. *Экология города* / Отв.ред. Н.С. Касимов. М.: Научный мир, 2004. 624 с.

Поступила в редакцию 02.08.2017