

ностью структурных агрегатов, что существенно ухудшает их водный и питательный режимы. Содержание подвижного фосфора в них снижено в 6 – 15 раз. Обеспеченность доступным азотом в загрязненных почвах несколько меньше, чем в фоновых, а в перемешанных почвах – в 2 – 3 раза ниже. Содержание валового фосфора изменяется аналогично щелочногидролизруемому азоту.

На отдельных участках ложа бывшего пруда-накопителя поверхность сильно замазучена, растительность на них отсутствует, в понижениях на поверхности воды имеются нефтяные пленки.

Как видим, загрязнение почв НСВ приводит к накоплению токсичных элементов на территории, значительно превышающей площадь непосредственного воздействия. Выше ПДК и фоновых значений в них аккумулируются элементы I–III классов токсичности: Cd, As, Zn, Mo, Cu, Co, Ni, Cr, Sr,

V. В растениях, произрастающих на загрязненных территориях, также происходит накопление токсичных элементов. В листьях земляники в концентрациях, существенно превышающих фоновые, обнаружены Pb, Sr, V, Rb и Ba, в листьях тысячелистника – Cd, Rb и Ba.

Таким образом, через 40 лет после воздействия НСВ происходит естественное расселение и рассолонцевание почв. Вместе с тем в них сохраняется повышенное содержание водорастворимых солей, обменного натрия. Сохраняется также удельное электрическое сопротивление, свойственное засоленным почвам. Вследствие процессов выщелачивания уменьшается содержание карбонатов, емкость катионного обмена, ухудшаются водный и питательный режимы, местами сохраняется замазученность. Загрязнение НСВ способствует также аккумуляции токсичных элементов в почвах и растениях.

левые и лабораторные работы. В центре склада была пробурена скважина глубиной 2,6 м, вскрывшая зону аэрации и грунтовые воды, залегающие на глубине 2,3 м. По разрезу скважины были отобраны образцы пород зоны аэрации и в них определены основные загрязнители. Аналогичные работы были повторены летом 1998 и 2003 гг. Геологический разрез и распределение нитратного азота, солянокислого растворимого фосфора, хлоридов и сульфатов по разрезу в 1995, 1998 и 2003 гг. представлены на рисунке 1.

На графиках хорошо видно, что кривые содержания  $N-NO_3$ ,  $P_2O_5$ , Cl в 2003 г. приближаются к прямой линии, параллельной оси абсцисс. Отсюда следует, что основная порция загрязнителей прошла через породы зоны аэрации мощностью около 2 м за 12 лет. Исключение составляет кривая содержания  $SO_4$ . В 2003 г. на глубине 0,7 м встречены очень высокие значения этого компонента. Они приурочены к прослою суглинка, залегающего под мелкозернистыми песками. Грунтовая вода под складом удобрений в 2003 г. была, так же как и в предыдущие годы, высокоминерализованной, содержащей  $N-NO_3$  – 365,4 мг/л;  $N-NH_4$  – 190,7;  $P-PO_4$  – 4,32; Cl – 3211;  $-SO_4$  1975 мг/л.

От склада удобрений в четыре стороны были проложены створы длиной 100...300 м. По ним летом 1995, 1998 и 2003 гг. пробурены скважины до уровня грунтовых вод (УГВ) с подробным описанием разрезов, отбором образцов пород и воды. Летом 1998 г. В.Т. Григорьевым были выполнены геодезические работы, составлен план участка. По данным о глубинах залегания грунтовых вод проведены гидроизогипсы первого от поверхности земли водоносного горизонта. Было установлено, что грунтовые воды текут на юго-юго-восток по песчаному прослою мощностью 0,5 м (вскрытая мощность), залегающему с глубины 1,4...1,5 м. Коэффициент фильтрации песков составляет около 1 м/сут; уклон грунтового потока – 0,005. Выше лежащие супеси и суглинки – плотные, слабопроницаемые с коэффициентом фильтрации порядка 0,01...0,015 м/сут. Химический состав грунтовых вод приведен в таблице 1.

Как следует из данных таблицы 1, в 1998 г. ареал загрязнения распространился в северо-западном направлении в грунтовых водах ориентировочно на 100 м. Анализ данных по содержанию различных загрязняющих веществ (ЗВ) в породах зоны аэрации свидетельствует об их загрязнении. Так, в скважине на расстоянии 73 м от склада на глубине 1,3 м обнаружено повышенное количество  $N-NO_3$  (274,4 мг/кг); на расстоянии 97 м на глубине 0,3 м содержание  $P-PO_4$  аномально высокое – 990 мг/кг, что свидетельствует о поверхностном смыве дождевыми или тальными водами элементов удобрения. Таким образом, ареал распространения ЗВ поверхностным стоком составляет здесь примерно 150 м.

По створу на северо-восток от склада в грунтовых водах, залегающих на глубине 1,4 м в 62 м от склада, в 1995 г. содержалось  $N-NH_4$  – 26,5 мг/л;  $N-NO_3$  – 31,82;  $N-NO_2$  – 2,16;  $SO_4$  – 1827 мг/л. В 1998 г. в том же месте в повышенном количестве содержались  $N-NH_4$  (3,51 мг/л),  $N-NO_3$  (3,27),  $N-NO_2$  (0,09),  $P_{общ}$  (0,09), Cl (191),  $SO_4$  – 42 мг/л. В скважинах на расстоянии более 200 м признаков загрязнения грунтовых вод, как и пород зоны аэрации (скважины 15 и 16), не обнаружено.

В юго-восточном направлении в скважине на расстоянии 74 м от цен-

УДК 551.495:544

Памяти друга и коллеги  
В.Т. Григорьева

## ВЛИЯНИЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ГРУНТОВЫХ ВОД (на примере водосбора Ивановского водохранилища)\*

Н.П. АХМЕТЬЕВА, Е.Е. ЛАПИНА, кандидаты геол.-минерал. Наук, О.В. РОЖКОВ (ИВНИС РАН)

В 1990 г. в 10 км от г. Конаково, на водоразделе рек Донховка и Крутец, на возвышенном открытом месте находился склад, в котором хранилась 1000 т минеральных удобрений (азотных, фосфорных и калийных). В 1992 г. с началом перестройки склад был сломан, удобрения частично расхищены, частично остались на месте и стали размываться дождями.

Для определения радиуса влияния этого крупного точечного источника загрязнения на окружающую среду летом 1995 г. нами были выполнены по-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 04-05-96705).

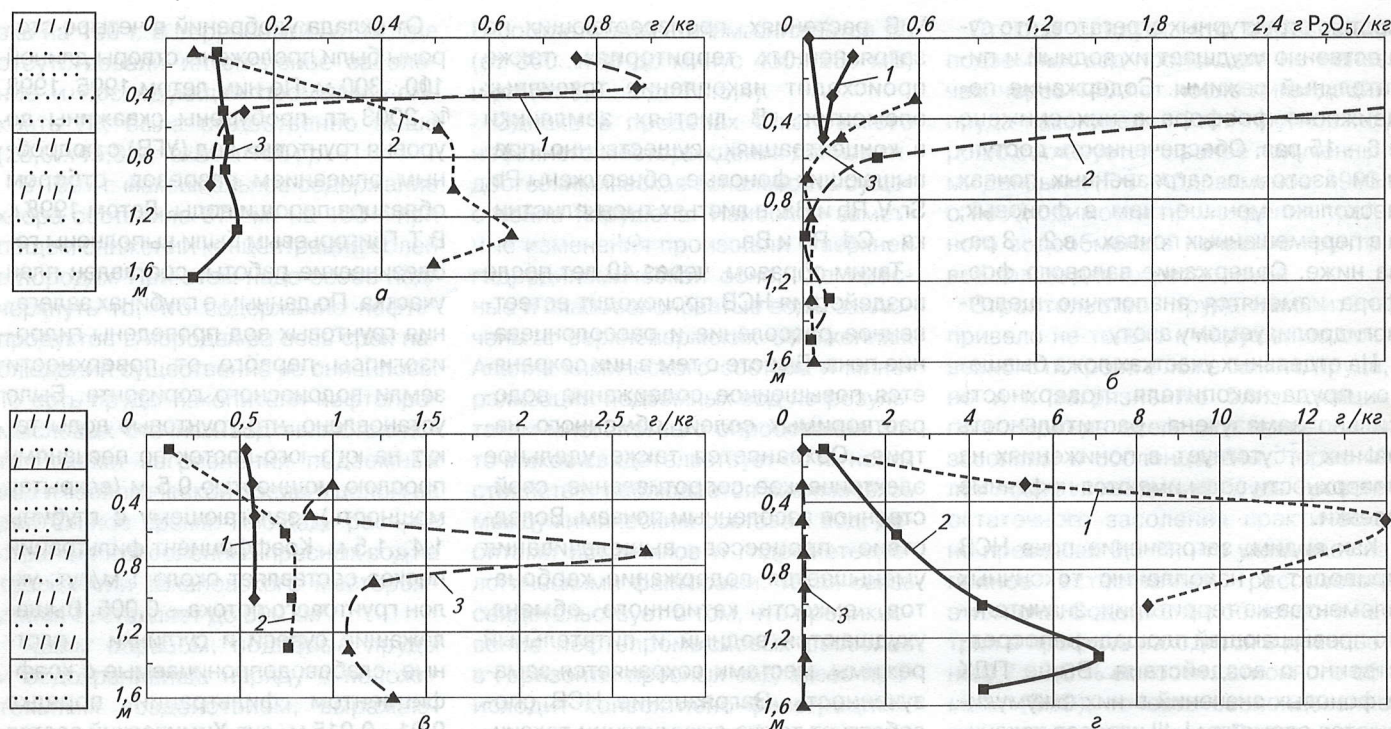


Рис. 1. Распределение основных элементов ЗВ по почвенному разрезу в центре склада: а – нитратного азота; б – фосфора (по Кирсанову); в – сульфатов; г – хлоридов; 1 – 3 соответственно 1995, 1998 (в этом году содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> на глубине 10 см составило 6,07 г/кг) и 2003 гг.

тра склада вскрыта сильно загрязненная грунтовая вода с содержанием N-NH<sub>4</sub> – 18,1 мг/л; N-NO<sub>3</sub> – 8,67; N-NO<sub>2</sub> – 3,12; Cl – 30; SO<sub>4</sub> – 20 мг/л; в по-

родах зоны аэрации на расстоянии 104 м отмечены следы загрязнения (рис. 2). Учитывая тот факт, что движение грунтового потока направлено,

главным образом, на юго – юго-восток, можно предположить, что радиус распространения ЗВ здесь составляет несколько сотен метров. В 2003 г. (табл. 2) юго-восточнее склада (300 м), на глубине 0,9 м были обнаружены воды с признаками загрязнения (N-NH<sub>4</sub> – 4,1 мг/л; N-NO<sub>2</sub> – 0,4; Cl – 57; SO<sub>4</sub> – 38 мг/л). Таким образом, за последние 10 лет фронт загрязнения грунтовых вод продвинулся ориентировочно на 300...400 м.

Таблица 1. Химический состав грунтовых вод, вскрытых скважинами в 1995 и 1998 гг.

Год	№ скв.	* м	УГВ	pH	N-NH <sub>4</sub> , мг/л	N-NO <sub>3</sub> , мг/л	N-NO <sub>2</sub> , мг/л	P-PO <sub>4</sub> , мг P/л	HCO <sub>3</sub> , мг/л	Cl, мг/л	SO <sub>4</sub> , мг/л	P <sub>общ</sub> , мг P/л
1995	Центр		2,3	8,3	30780	16,2	0,48	31,6	9150	**	4244	35,6
1998	склада		1,5	-	0,24	6,38	0,076	1,37	12200	34750	10400	1,4
<i>Направление на северо-запад</i>												
1995	1	97	2,3	7,23	5450,6	28,1	24	0,006	341,6	177	50212	0,076
1998	12	83	0,9	-	4,35	25,5	3,28	0,001	268,4	69,5	21	0,04
	13	103	0,6	-	0,5	1,68	0,067	0,005	280,6	3,5	27	0,014
	14	153	0,8	-	0,44	1,0	0,054	0,002	195,2	3,5	27	0,019
<i>Направление на северо-восток</i>												
1995	2	56	-	4,6	69	1,51	1,2	0,016	9,15	53	102	0,17
	3	62	-	5,0	26,5	31,82	2,16	0,017	1,8	8,5	1827	0,063
	4	70	-	4,25	107	32,5	1,08	0,076	9,15	9,2	65	0,146
1998	15	82	1,4	-	0,44	1,0	0,054	0,002	195,2	3,5	27	0,019
	16	199	1,2	-	0,24	2,8	0,019	0,009	-	9	42	0,07
<i>Направление на юго-запад</i>												
1995	5	17	2,1	7,41	36,7	45,5	0,12	-	-	-	-	0,3
	6	41	2,0	5,66	1,91	2,02	0,035	0,02	18,3	18	34	0,12
<i>Направление на юго-восток</i>												
1995	7	39	2,2	5,05	30,4	42,1	2,4	0,16	61	-	242	-
	8	55	0,6	6,65	3,07	1,87	0,034	1,43	18,3	199	203	1,47
	9	60	-	6,3	4,09	14,5	0,12	3,41	61	122	448	3,41
	10	74	2,9	-	18,1	8,67	3,12	0,011	18,3	30	20	0,17
	11	104	***	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечание: \* – расстояние скважины от центра склада. \*\* – содержание хлора очень высокое; \*\*\* – скважина глубиной 3 м, не вскрывшая грунтовые воды.

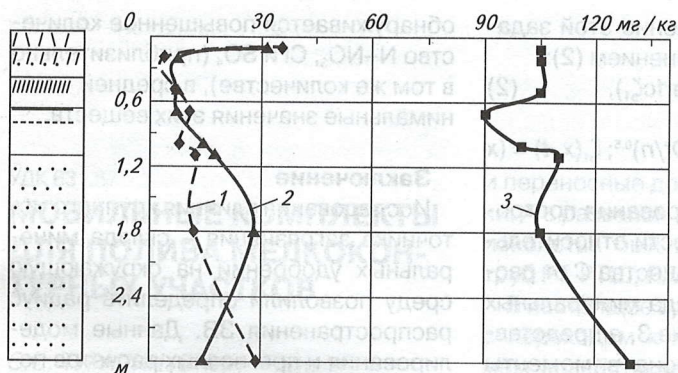
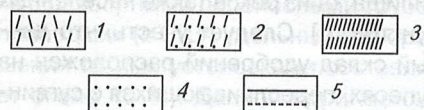


Рис. 2. Распределение ЗВ по грунтам зоны аэрации в 104 м от склада удобрений: 1 – 3 – соответственно N-NO<sub>3</sub>, Cl и SO<sub>4</sub>



Условные обозначения к рис. 1 и 2: 1 – дерн; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – песок; 5 – глина

кие изменения произошли в ареале ЗВ за последние годы, были пробурены скважины в центре склада, в 500 м к западу от него и 300 м к востоку, а также 10 скважин в торфяных массивах, окружающих склад.

По верхнему болоту Тарлаковский Мох, расположенному в 1,2 км южнее склада, был пробурен створ длиной около 2 км из пяти скважин, которые вскрыли торфяники мощностью до 1,7 м, залегающие на оглеенных суглинках. В скважинах были отобраны пробы торфа и болотных вод. Результаты химического анализа торфа свидетельствуют о некотором его загрязнении: в разрезах скважин 11 (104 м от склада) и 19 в верхней части отмечается повышенное количество NH<sub>4</sub> (63,5 мг N на 100 г торфа), K (39,2 мг в 100 г) и значительное содержание подвижного фосфора (22...32 мг P в 100 г торфа). На глубинах 1,2...1,7 м также наблюдается высокое содержание аммонийного и нитратного азота, калия и сульфатов. В 1,5 км южнее склада на глубине 0,3...0,4 м содержится много калия (28,5...29,8 мг в 100 г торфа). Болотные воды содержат в повышенных количествах сульфаты, общий фосфор, иногда аммонийный азот (табл. 2). На наш взгляд, это можно объяснить лишь влиянием склада минеральных

удобрений. Поступление ЗВ в болота происходит, вероятнее всего, с поверхностным стоком. В колодцах садово-огородных участков на расстоянии 2 км к югу от склада не отмечено следов загрязнения. Таким образом, можно предположить, что к 2004 г. радиус влияния склада удобрений распространился на юг до центральной части болота – до 1,5 км от него.

Летом 2004 г. было обследовано также низинное болото Куманичник в 1,2 км западнее склада. Болото представляет собой топь с блюдцами озер размерами 3×5, 5×10 м<sup>2</sup>, почти непроходимое, с кочками высотой 0,5...0,7 м, на которых произрастают ольха, осина, реже береза, кустарники. На болоте была пройдена скважина глубиной 1,2 м, до подстилающих оглеенных светло-серых суглинков, а из одного озера взята болотная вода. Уровень грунтовых вод в скважине установился на глубине 0,4...0,5 м. Анализы воды, представленные в таблице 2, свидетельствуют о некотором

ее загрязнении, вероятнее всего, связанном со складом удобрений.

Было также обследовано верхнее болото, расположенное в 1 км восточнее склада. Здесь было пройдено три скважины с опробованием торфа до глубины 0,7 м (до подстилающих суглинков) и взяты пробы болотных вод. Анализы воды и проб грунта показали на отсутствие в них ЗВ.

Таким образом, за 12 лет (с 1992 г.) интенсивного поступления минеральных удобрений в окружающую среду ареал их в грунтовых водах занимает около 300 га. Площадь загрязнения, вызываемая поверхностным стоком, атмосферными осадками и, возможно, ветровым переносом, в десятки раз больше.

Для более точной оценки скорости распространения ЗВ по водоносному горизонту и прогноза развития загрязнения было выполнено моделирование миграции Cl в юго-восточном направлении от склада минеральных удобрений (x = 0) с постоянной концентрацией C<sub>0</sub> = 4000 мг/л [4]. Выбор хлор-иона обусловлен тем, что он является мобильным и нейтральным компонентом удобрений (не сорбируется водовмещающими породами). Другие компоненты, в частности, аммонийный азот и подвижный фосфор, активно взаимодействуют с породами, их концентрации меняются в зави-

Таблица 2. Химический состав грунтовых и болотных вод, вскрытых скважинами в 2003 и 2004 гг.

Год	* м	УГВ	pH	N-NH <sub>4</sub> , мг/л	N-NO <sub>3</sub> , мг/л	N-NO <sub>2</sub> , мг/л	P-PO <sub>4</sub> , мг P/л	HCO <sub>3</sub> , мг/л	Cl, мг/л	SO <sub>4</sub> , мг/л	P <sub>общ</sub> , мг P/л
2003	0	1,6	8,39	190,7	365,4	0,24	4,32	138	3211	1975	6,5
Направление на юго-восток											
	300	0,9	7,15	4,1	0,87	0,4	0,25	292,8	57	38	2,25
Болото Тарлаковский Мох											
Направление на юго-юго-восток											
	400	0,25	4,85	4,8	1,1	0,27	0,15	36,6	5,4	2,7	0,33
	500	0,4	4,35	4,3	0,9	0,16	2,84	36,6	6,8	1,4	5,3
	750	0,4	4,32	11,5	3,5	0,08	0,85	73,2	0,7	27	3,1
	1000	–	–	4,6	1,65	0,1	0,13	24,4	4	10	0,32
	1200	–	3,89	7,8	2,3	0,18	0,9	61	1,3	1	2,9
Направление на юг											
	2000	0,75	7,71	0,3	0,41	0,008	0,022	536,8	4,7	51	0,052
Направление на восток											
	700	0,1	5,36	5,4	1,6	0,31	0,12	30,5	10,8	18	0,14
Направление на запад											
2004	500	1,9	6,03	0,92	0,26	0,032	0,05	24,4	1,9	15	0,052
Болото Куманичник											
Направление на запад											
	1200	0,4	6,93	3,35	0,62	Сл.	0,009	463,6	47	6	0,06

Примечание. \* – расстояние от центра склада до устья скважины.

симости от окислительно-восстановительных условий среды [1].

Для водоносного горизонта, сложенного мелкозернистыми песками, по которому происходит миграция ЗВ, были приняты следующие характеристики: пористость  $n = 0,11$ , скорость фильтрации  $v = 0,01$  м/сут, коэффициент микродисперсии  $D = 0,001$  м<sup>2</sup>/сут; для супесчаного водоносного горизонта –  $n = 0,15$ ,  $v = 0,002$  м/сут и  $D = 0,01$  м<sup>2</sup>/сут. Значения этих параметров выбраны с целью наибольшего приближения расчетных точек к экспериментальным [3].

Было принято также, что фильтрационный поток является одномерным (плоскопараллельным) и стационарным, тогда неизвестная относительная концентрация хлора  $C = c/C_0$  как функция  $C(x, t)$  находится из решения уравнения конвективно-дисперсионного переноса (1):

$$n\partial C/\partial t = D\partial^2 C/\partial x^2 + v\partial C/\partial x. \quad (1)$$

Начальные и граничные условия имеют следующий вид:

$$C(x, 0) = 0 \quad (x > 0);$$

$$C(0, t) = 1 \quad (t > 0);$$

$$C(\infty, 0) = 0 \quad (x > 0).$$

Аналитическое решение этой задачи представлено уравнением (2):

$$C(x, t) = 0,5(\operatorname{erfc}\zeta + \operatorname{erfc}\zeta_1), \quad (2)$$

где

$$\zeta(x, t) \equiv (x - vt/n)/2(Dt/n)^{0,5}; \quad \zeta_1(x, t) \equiv (x + vt/n)/2(Dt/n)^{0,5}.$$

По данным моделирования построены кривые зависимости относительной концентрации вещества  $C$  от расстояния  $x$  (м) до склада минеральных удобрений. На рисунке 3, а представлен перенос хлор-иона в моменты времени  $t_1 = 540$  сут,  $t_2 = 3285$  сут (9 лет),  $t_3 = 18250$  сут (50 лет) в песках; на рисунке 3, б – в супесях в моменты времени:  $t_1 = 2000$  сут (6 лет),  $t_2 = 3285$  сут (9 лет),  $t_3 = 4745$  сут (13 лет),  $t_4 = 18250$  сут (50 лет). Из графиков видно, что хлор-ион продвигается по песчаному водоносному горизонту со скоростью 300 м за 9 лет. Через 50 лет можно ожидать, что загрязнитель пройдет путь в 1700 м от источника загрязнения (где его концентрация будет равна значению ПДК – 350 мг/л). В супесчаных породах скорость движения нейтрального загрязнителя составит около 40 м за три года, тогда через 50 лет расстояние от источника загрязнения будет равно 350 м.

Анализ почвенных образцов, отобранных из зоны аэрации, свидетельствует о значительном загрязнении некоторых из прослоев. Предположительно загрязнение пород происходит сверху в результате поверхностного смыва, а также снизу, в связи с колебанием УГВ и проникновением загрязненной воды в вышележащие слои. Из рисунка 2 видно, что в верхней части разреза содержание  $N-NO_3$ ,  $Cl$  и  $SO_4$  высокое, что свидетельствует о приносном загрязнении сверху. В нижней части зоны аэрации (на глубине 1,8...3 м) в грунтах также

обнаруживается повышенное количество  $N-NO_3$ ,  $Cl$  и  $SO_4$  (приблизительно в том же количестве), в средней – минимальные значения этих веществ.

### Заключение

Исследования влияния крупного источника загрязнения – склада минеральных удобрений на окружающую среду позволили определить радиус распространения ЗВ. Данные моделирования и прогнозных расчетов показывают, что подобного рода загрязнители нельзя располагать в водоохранной зоне Ивановского водохранилища, близ рек, а также населенных пунктов [5]. Следует учесть, что данный склад удобрений расположен на супесях, переслаивающихся с суглинками и песками. В случае же песчаного и супесчаного строения зоны аэрации процесс растекания загрязнителя будет происходить более интенсивно, охватывая большие территории. Так, нам известно, что на окраине д. Вахино в 600...700 м от р. Инюхи, впадающей в Ивановское водохранилище, в начале 80-х годов прошлого столетия также был аналогичный типовой склад. Здесь подстилающие породы представлены супесями мощностью 1,5 м, залегающими на плотных суглинках. Влияние склада на качество грунтовых вод заметно и в настоящее время (через 24 года) – вода в роднике у д. Терехово в двух километрах от бывшего склада удобрений содержит в повышенных количествах нитраты, сульфаты и хлориды.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметьева Н.П., Лола М.В., Горещкая А.Г. Загрязнение ГВ удобрениями. – М.: Наука, 1991.
2. Кондратас А.Р. Натурные исследования влияния минеральных удобрений на качество грунтовых и дренажных вод // Водные ресурсы. – 1987. – Т. 21. – № 6.
3. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. – М.: МГУ, 1996.
4. Методика изучения, оценки и прогноза изменений экологического состояния подземных вод с использованием математического моделирования. – М.: ВСЕГИН-ГЕО, 2000.
5. Правила охраны и рационального использования водных, гидробиологических и других природных ресурсов Ивановского водохранилища на реке Волге. – М., 1980.

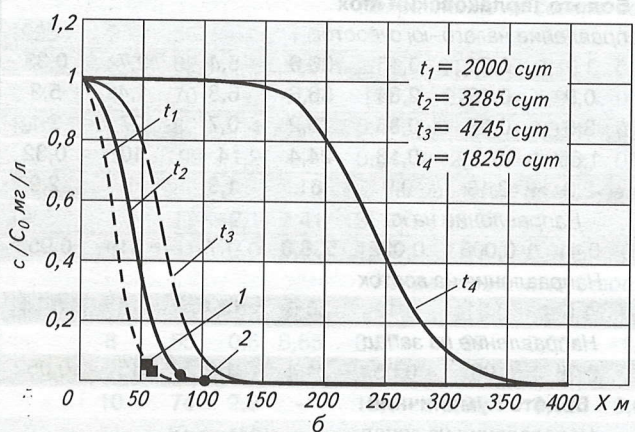
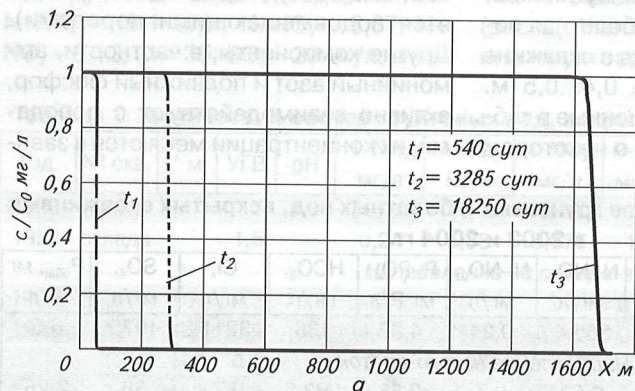


Рис. 3. Перенос хлорид-иона грунтовыми водами в песчаных (а) и супесчаных (б) грунтах