

**Б. М. ШЕНЬКМАН**Институт земной коры СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия, bshenk@crust.irk.ru**ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ И ТЕПЛОВАЯ ТЕХНОГЕННЫЕ АНОМАЛИИ  
В РАЙОНЕ БАЙКАЛЬСКОГО ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА**

*Выполнена оценка гидрогеологической обстановки на промплощадке Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) в режиме работающего предприятия. Установлено глубокое преобразование естественного гидрогеохимического и теплового полей, в результате которого сформировались контрастные по минерализации, составу (сульфатные и карбонатные) и кислотно-щелочному состоянию подземные воды с температурой 20–50 °С. Проанализировано строение гидрогеохимической аномалии. Выявлено, что она подвержена внутригодовым изменениям по величине минерализации и частично составу. Серия проведенных дискретных гидрогеохимических каротажей показала, что в период инфильтрационного питания минерализация снижается до 1 г/л, а состав приближается к сульфатно-гидрокарбонатному. При эпизодических остановках производства отчетливо прослеживается эффект поршневого вытеснения загрязненных вод транзитным стоком: максимум минерализации смещается вплотную к контуру разгрузки — оз. Байкал. Выяснено, что перенос загрязняющих веществ с подземным стоком в оз. Байкал происходит с затуханием по глубине. Зональные опытно-фильтрационные исследования показали, что в профиле общей мощностью 50 м выделяются четыре примерно равновеликих интервала с действительной скоростью движения (сверху вниз): 1,9; 0,84; 0,30 и 0,15 м/сут. Таким образом определено, что через верхний интервал разгружается 63 % наиболее загрязненного подземного стока, а через два нижних (наименее загрязненных) — всего 10 %. Сделан вывод, что ликвидация БЦБК приведет к исчезновению аномалий. Регулярные наблюдения и специализированные исследования 1992–2013 гг. свидетельствуют, что при ликвидации источника загрязнения очистка подземного потока от загрязняющих компонентов до уровня локального фона произойдет в течение года.*

Ключевые слова: структура подземного потока, источники загрязнения, внутригодовая изменчивость качественного состояния подземных вод, тепловое загрязнение, взаимодействие объекта с оз. Байкал, прогноз изменения экологической обстановки.

**B. M. SHEN'KMAN**Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
664033, Irkutsk, Lermontova str., 128, Russia, bshenk@crust.irk.ru**HYDROGEOCHEMICAL AND THERMAL TECHNOGENIC ANOMALIES IN THE AREA  
OF THE BAIKALSK PULP AND PAPER MILL**

*An assessment is made of the hydrogeological situation on the industrial site of the Baikalsk Pulp and Paper Mill (BPPM) in the mode of operation of the enterprise. A profound transformation of the natural hydrogeochemical and thermal fields has been ascertained, resulting in the formation of contrasting (in mineralization, composition (sulfate and carbonate) and alkali-acid state) groundwater with a temperature of 20–50 °C. The structure of the hydrogeochemical anomaly has been analyzed. It is ascertained that it undergoes intra-annual changes in the magnitude of mineralization and, partly, in composition. A series of discrete hydrogeochemical logging surveys showed that at the period of infiltration recharge the mineralization decreases to 1 g/L, and the composition approaches a sulfate-hydrocarbonate composition. During production shutdown intervals there occurs a clearly pronounced effect of piston-like displacement of polluted waters by the transit runoff: the maximum of mineralization is shifted right up to the discharge boundary, Lake Baikal. It is found that the transport of pollutants with the groundwater flow to Lake Baikal occurs with an attenuation in depth. Zonal experimental-seepage investigations showed that the profile totaling 50 m in thickness exhibits four approximately equivalent intervals with the effective velocity (from top to bottom) of 1.9; 0.84; 0.30 and 0.15 m/day. Thus it has been determined that 63 % of the most polluted groundwater flow is discharged through the upper interval, and a mere 10 % through the two lower (least polluted) intervals. It is concluded that the liquidation of the BPPM will lead to the disappearance of the anomalies. Observations at regular intervals and specialized investigations from 1992–2013 testify that in the event that the pollution source is liquidated, the groundwater flow will be cleared of the polluting components to a local background level within a year.*

Keywords: structure of seepage flow, pollution sources, intra-annual variability in qualitative state of groundwater, thermal pollution, impact of the facility on Lake Baikal, forecast of changes in ecological situation.

Заккрытие Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) и прекращение работы очистных сооружений, на которые поступали сильно загрязненные дренажные воды, приводит к необходимости оценки влияния подземного стока в оз. Байкал в изменившихся условиях. По результатам специализированных исследований, проведенных в 1999 г., сделан неутешительный вывод: загрязнение подземных вод просуществует длительное время после прекращения производства, а водовмещающие породы останутся необратимо загрязненными. Этот прогноз, сформулированный в техническом отчете, очень слабо обоснован и ориентирует на неопределенно длительное, но малоэффективное и дорогостоящее принудительное изъятие «загрязненных» подземных вод. Обобщение и анализ накопленного за период 1992–2013 гг. материала дает возможность сделать более обоснованный прогноз о краткосрочном процессе самоочищения подземных вод.

**Основные особенности геолого-гидрогеологической обстановки.** Комбинат размещается на пологонаклонной поверхности приозерной долины шириной немного более 2 км. В ее пределах получили развитие озерные отложения, мощность которых от предгорий до Байкала возрастает от 30 до 500 м. До глубины примерно 150 м они представлены валунно-галечниковым грунтом с заполнителем от суглинисто-песчаного (предгорная полоса) до песчано-гравийного (прибрежная зона). С глубиной доля мелких фракций в материале заполнителя заметно возрастает. В границах промплощадки глубина залегания грунтовых вод уменьшается в сторону озера с 13 до 5 м. В этом же направлении снижается уклон подземного потока с 3,5 до 3 %. До глубины 70 м явные водоупорные слои не встречены. Амплитуда сезонного колебания уровня не превышает 1–2 м. Обратные уклоны в береговой полосе отсутствуют.

**Фильтрационное поле и расход подземного потока.** Величина коэффициента фильтрации ( $k_f$ ), по данным опытно-фильтрационных работ (ОФР), варьирует в диапазоне 10–60 м/сут. В горизонтальной плоскости наблюдается сравнительно равномерное уменьшение  $k_f$  по мере удаления от водоема (рис. 1). Плановая регулярная изменчивость нарушается узкой зоной повышенной проницаемости, ось которой субнормальна берегу. Изменчивость с глубиной выражена весьма отчетливо: кривые  $k_f - f(H)$  с приемлемой достоверностью иллюстрируют характер снижения фильтрационных свойств. Так, наибольшая величина  $k_f$  прослеживается до глубины не более 20 м. Далее происходит нелинейное снижение до 10 м/сут и менее. Некоторая неопределенность зачастую обусловлена большой величиной интервала опробования.

Расход подземного потока ( $Q$ ) определим по формуле Дарси:

$$Q = k_f H B I,$$

где  $H$  — вскрытая мощность обводненных пород, м;  $B$  — ширина потока (1000 м);  $I$  — гидравлический уклон.

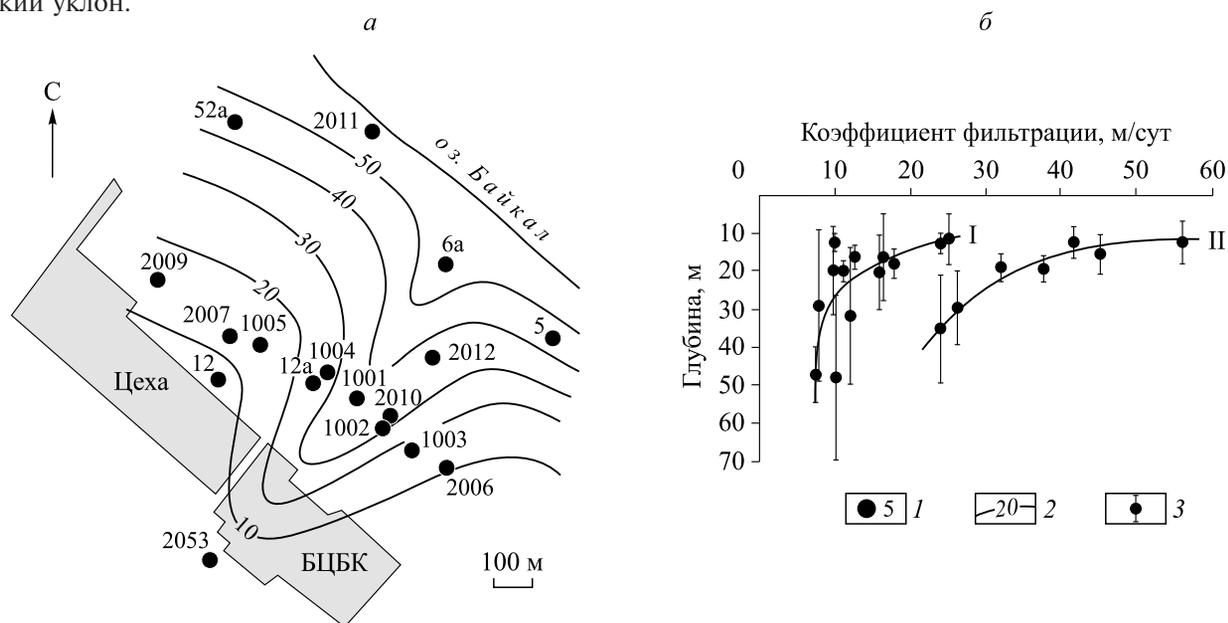


Рис. 1. Схема изолиний величин коэффициента фильтрации (а) и его изменение с глубиной (б).

1 — наблюдательная скважина и ее номер; 2 — изолиния величины коэффициента фильтрации, м/сут; 3 — величина интервала опробования, кружком показана его середина.

I — фильтрационное поле прибрежной полосы и аномального участка; II — остальная часть территории.

Расход потока на уресе озера определится суммированием двух слоев с различной мощностью и  $k_{\phi}$ :

$$Q = Q_1 + Q_2 = k_{\phi_1} H_1 B I_1 + k_{\phi_2} H_2 B I_2,$$

$$Q = 50 \cdot 15 \cdot 1000 \cdot 0,003 + 10 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 0,003 = 3750 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

В сечении, где происходит «запуск» поллютантов, расход потока при  $k_{\phi} = 10$  м/сут и  $I = 0,0035$  будет равен

$$Q = 10 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 0,0035 = 1750 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Приращение расхода между сечениями, равное  $2250 \text{ м}^3/\text{сут}$ , происходит исключительно за счет инфильтрации гидрометеоров, тогда как сток, контролируемый верхним сечением, сформирован транзитом и утечками из водонесущих систем.

По результатам трех кустовых откачек удалось определить эффективную пористость ( $n$ ), равную в среднем  $0,08$ , что сделало возможным оценить действительную скорость ( $V$ ) подземного потока в нижнем сечении:

$$V = Q/HBn,$$

$$V_1 = 2250/15 \cdot 1000 \cdot 0,08 = 1,9 \text{ м/сут,}$$

$$V_2 = 1500/50 \cdot 1000 \cdot 0,08 = 0,32 \text{ м/сут.}$$

Таким образом, соотношение скоростей означает шестикратное снижение темпа водообмена в интервале  $20-70$  м. Этот предварительный вывод будет подтвержден и детализирован при рассмотрении гидрогеохимической обстановки.

**Гидрогеохимическая обстановка на промплощадке.** До хозяйственного освоения территории естественный гидрогеохимический фон имел низкую минерализацию, не превышающую  $0,1$  г/л, гидрокарбонатный щелочноземельный состав, близкую к нейтральной реакцию, резко окислительную обстановку и высокую насыщенность кислородом [1].

В настоящее время подобного рода условия сохранились лишь на небольших изолированных участках. На всей площади, занимаемой г. Байкальском, в той или иной степени установлено нарушение естественного фона. Так, полная метаморфизация химического состава подземных вод наблюдается почти исключительно в границах промплощадки, что напрямую связано с утечками из производственного оборудования и трубопроводов. Всего на площадке три постоянно действующих источника загрязнения: два комплексных (ТЭЦ и главный корпус БЦБК) и один простой (отвал коры). Объекты ТЭЦ: собственно ТЭЦ, выпарной цех и отстойник зольной пульпы; цеха главного корпуса — варочный, отбельный, сушильный, регенерации щелочи и каустизации извести, склад сульфата (рис. 2, а). Размещение источников загрязнения обусловило характерную гидрогеохимическую зональность подземного потока. В ленте стока под варочным и регенерационно-каустизационными цехами прослеживается максимальная минерализация карбонатных натриевых вод с величиной водородного показателя до  $12,5$ . Это поле окаймляют воды гидрокарбонатно-сульфатного состава с минерализацией до  $2,5$  г/л и рН, доходящим до  $4$ . Состав и кислотность обусловлены в основном промстоками ТЭЦ и отбельного цеха. Аномальный фрагмент окружен водами гидрокарбонатного состава с минерализацией  $0,2-0,5$  г/л и близкой к нейтральной реакцией. По величине минерализации изученная часть гидрогеологического разреза сложным образом стратифицирована. Максимум минерализации вблизи контура дренирования зафиксирован на глубине  $5$  м. Выше и ниже наблюдается снижение: медленное вверх и быстрое — к забою скважины. И еще одна особенность: по мере удаления от источника эмиссии минерализация возрастает — проявляется эффект поршневого вытеснения под воздействием транзитного стока. Таково положение, зафиксированное на  $1$  декабря  $1992$  г., т. е. в период независимого питания подземных вод.

Последующие каротажи отмечали постепенное уменьшение минерализации,  $1$  октября  $1993$  г. был установлен минимум и сопутствующая ему коренная деформация зональности. Максимум минерализации снизился до  $2$  г/л. В верхнем слое потока доминирующее место заняли гидрокарбонатные, а в центре поля — гидрокарбонатно-сульфатные воды. В вертикальном разрезе сократилась доля карбонатных вод, но появилась подзона хлоридно-сульфатных вод. Опреснение произошло по всему профилю, но крайне неравномерно по глубине. Следует подчеркнуть два новых обстоятельства. Если в холодный период снижение минерализации происходило вверх по потоку, то в теплое время года аналогичный процесс прослеживается в обратном направлении (см. рис. 2, б). Смена вектора опрес-

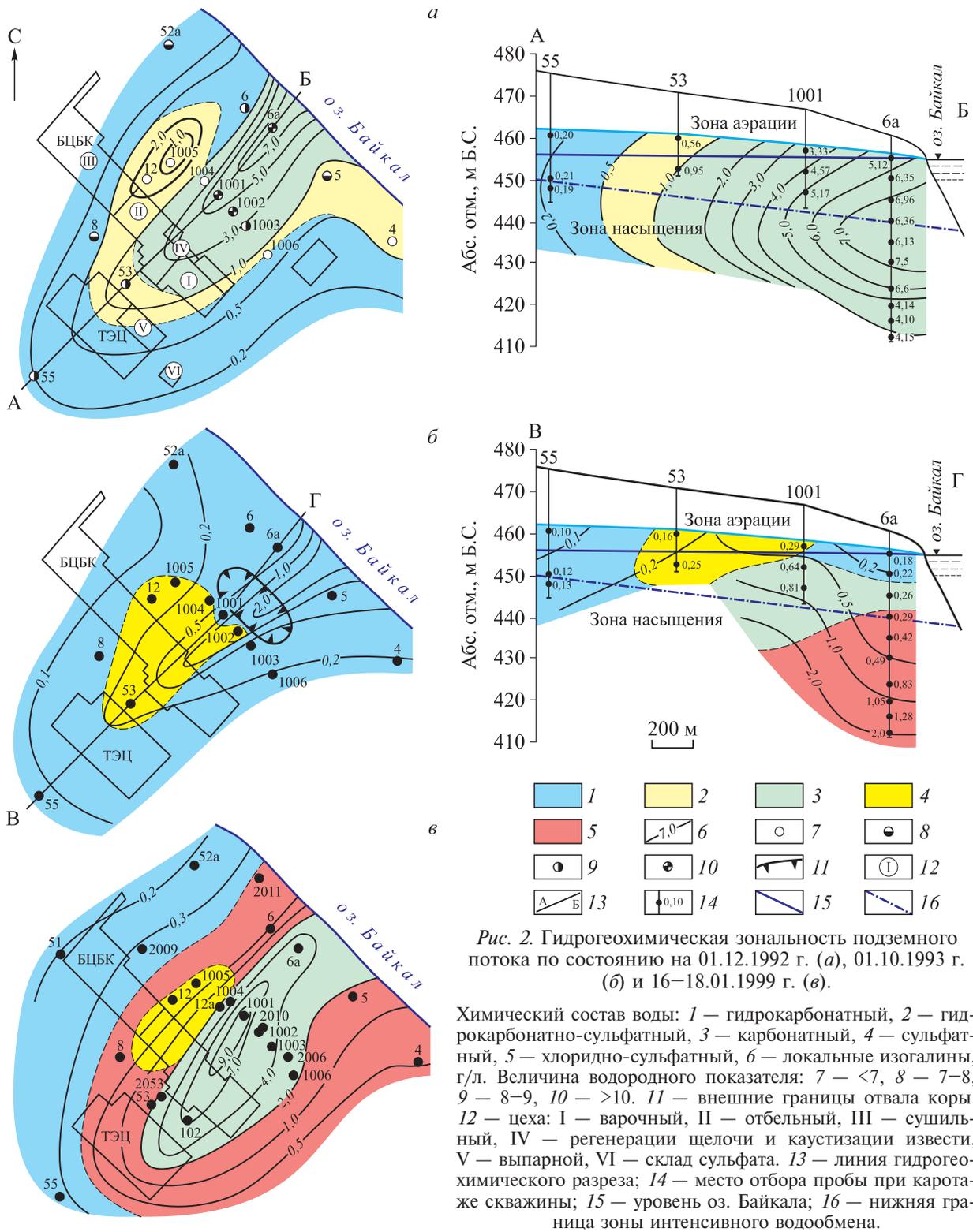


Рис. 2. Гидрогеохимическая зональность подземного потока по состоянию на 01.12.1992 г. (а), 01.10.1993 г. (б) и 16–18.01.1999 г. (в).

Химический состав воды: 1 – гидрокарбонатный, 2 – гидрокарбонатно-сульфатный, 3 – карбонатный, 4 – сульфатный, 5 – хлоридно-сульфатный, 6 – локальные изогалины, г/л. Величина водородного показателя: 7 – <7, 8 – 7–8, 9 – 8–9, 10 – >10. 11 – внешние границы отвала коры. 12 – цеха: I – варочный, II – отбельный, III – сушильный, IV – регенерации щелочи и каустизации извести, V – выпарной, VI – склад сульфата. 13 – линия гидрогеохимического разреза; 14 – место отбора пробы при каротаже скважины; 15 – уровень оз. Байкал; 16 – нижняя граница зоны интенсивного водообмена.

нения означает, что процесс обусловлен преимущественно инфильтрацией гидromетeоров, эффективность которой существенно выше поршневого вытеснения.

Появление в нижней части разреза хлоридно-сульфатных вод пониженной минерализации связано с разрушением растворимых сульфо- и хлорлигнина, образующихся при варке древесины в

щелочном растворе [2]. Попадая в подкисленную и насыщенную углекислотой среду подземного потока, они разрушаются с выделением в жидкую фазу сульфат- и хлор-иона и выпадением лигнина в осадок. Условия для распада действительно существуют: в прибрежной полосе величина рН снижается до 6–7, а подземный поток, проходя под отвалом коры, обогащается диоксидом углерода до 600 мг/л. В результате концентрация лигнина на пути фильтрации между источником загрязнения и контуром дренирования изменяется от 300 (скв. 1003) до 3,3 мг/л (скв. 6а). Деградиация сульфо- и хлорлигнина сопровождалась существенным уменьшением модульных коэффициентов ( $M/SO_4$ ,  $M/Cl$ ). Если вблизи источника загрязнения (скв. 1001) они имели величину 9,4 и 207, то недалеко от контура дренирования (скв. 6а) значения модулей оказались равными 2,56 и 9,3 соответственно (табл. 1).

Внутригодовая цикличность качественного состояния подземного стока отличается многолетней устойчивостью, что нашло свое подтверждение при дискретном каротаже 1999 г. (см. табл. 1). Поэтому не случайно гидрогеохимические карты на декабрь 1992 г. и январь 1999 г. обладают большим сходством (см. рис. 2, в). Мониторинг 2002–2013 гг., проводимый без дискретного каротажа, тем не менее определенно фиксирует сезонную цикличность, хотя с 2000 г. гидрогеодинамическое поле претерпело заметную деформацию под воздействием дренажной системы. Несмотря на свою двухкратную модернизацию, система из восьми скважин все же не смогла полностью перехватить поток загрязненных вод: на контуре дренирования максимальная минерализация оставалась высокой — 1,3–2,2 г/л [3].

Цикличность дает возможность детализировать скоростную эпюру в диапазоне 5–50 м (скв. 6а). Понятно, что степень опреснения пропорциональна темпу водообмена, определяемого действительной скоростью потока. При сопоставлении рис. 2, а и б видим, что в интервалах 5–20, 20–35, 35–45, 45–50 м минерализация уменьшалась соответственно в 25, 11, 4 и 2 раза. Следовательно, при величине скорости верхнего интервала 1,9 м/сут скорости в последующих интервалах окажутся равными 0,84, 0,30 и 0,15 м/сут. При таком распределении послойный расход подземного потока составит 2370, 1050, 250 и 80 м<sup>3</sup>/сут. Из этого следует, что через верхний интервал проходит 63 % валового самого загрязненного подземного стока, а через два нижних — всего 10 %.

В воде обнаружены также микроэлементы в довольно высоких концентрациях (табл. 2), хотя и естественный, и локальный фон обладают низким уровнем.

Таблица 1

Химический состав и минерализация подземных вод

Скважина	Дата	Глубина, м	рН	Eh, мВ	Компоненты состава, мг/л							Минерализация, г/л	
					Na	Ca	Mg	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl		
4	20–24.07.2001	10	6,71	+238	47,7	27	6,1	176	0	63,8	7,45	0,36	
5		12	6,99	+140	350	116	30,4	86	0	429	32,6	1,87	
6		12	7,08	+162	98,0	14	4,3	256	0	57,6	10,6	0,46	
6а		25	7,06	+233	345	51	10,2	159	0	497	136	1,27	
1001		12	11,7	+75	1135	2	0,12	0	1309	359	16,3	3,38	
2011		5	8,27	+285	6,0	19	10,3	104	0	4	14,5	0,17	
2011		65	6,87	+372	3,3	46	9,73	144	0	35,8	13,8	0,29	
2012		10	6,64	+144	215	150	60,8	1355	0	Следы	12,4	1,92	
2012		65	6,8	+120	219	145	66,9	1357	0	»	15,6	1,95	
6а		27.03.1999	20	>8,4	–	854	0	0	0	456	806	147	2,30
6а		12.11.1999	20	7,1	–	445	39	11	20	0	609	189	1,57
12а		17.01.1999	31	5,6	–	172	289	117	131	0	1722	26	2,46
12а		23.04.1999	31	5,9	–	95	86	41	0	0	537	6	0,76
53		26.04.1999	13	7,8	–	633	24	15	891	0	696	30	2,31
53	19.08.1999	13	7,1	–	179	4	2	390	0	78	16	0,68	
1001	18.01.1999	18	10,2	–	4060	39	23	758	3726	305	118	9,91	
1001	16.08.1999	18	10,3	–	442	2	0	73	0	207	49	0,41	
2053	04.07.1999	30	–	–	375	11	0	952	0	12	5	1,45	
2053	19.08.1999	30	–	–	252	7	1,1	622	0	38	14	0,96	
ПДС*	1999	–	7–8,5	–	–	–	–	–	–	10	30	–	

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3: прочерк — ненормируемые показатели.

\* ПДС — предельно допустимый сброс.

Таблица 2

## Микрокомпонентный состав подземных вод (метод определения — атомная адсорбция, максимальные значения)

Скважина	Компоненты состава, мкг/л									
	Fe	Mn	Zn	Cu	V	B	Ni	P	Si	Al
ба	230	<20	450	<10	12	76	<5	357	5,2	40
1001	600	102	450	68	205	—	51	4270	160	12 800
2011	100	7	23	1,9	4,6	48	2	3,3	26	10
2012	108 000	7240	15	4,2	14	282	7	767	32	2300
Локальный фон	280	4	15	1,7	3,6	35	5	3,3	3,4	160
Естественный фон	50	2	10	0,8	0,8	16	2	1,7	3,2	20
ПДС, 1999	—	—	—	—	—	—	—	13,3	—	40

Особенно сильное обогащение свойственно железу и марганцу в ареале кислых и околонейтральных вод с величиной Eh ниже +150 мВ (скв. 2012). Источником элементов в основном является отвал коры. Цинк ассоциируется с карбонатными водами и присутствует в больших количествах на всем пути фильтрации (скв. 1001 и ба). В значимых количествах обнаружены ванадий и бор — углефильные элементы, явный признак участия в загрязнении ТЭЦ, причем это влияние для бора остается заметным даже на контуре дренирования. Наконец, укажем особо на элементы с весьма низким естественным и локальным фоном, но с очень высокой концентрацией (фосфор, кремний, алюминий). Все они устойчивы только в щелочных условиях, поэтому до контура влияния дошли в количествах, равных либо меньше ПДС (предельно допустимого сброса очищенных стоков в Байкал). Появление элементов связано с растворением алюмосиликатов в щелочных и кислых водах. Однако их миграционная способность резко снижается в околонейтральных условиях.

Химическое загрязнение подземных вод представлено также большим набором органических веществ, сопутствующих производству целлюлозы. В процессе мониторинга анализировалось 12 органических соединений, четыре из которых присутствуют в виде следов или ниже чувствительности метода анализа (хлороформ, скипидар, ДМС, ДМДС). Помимо индивидуальных веществ, определялись и интегральные показатели — перманганатная и бихроматная окисляемости (ОП и ХПК). В табл. 3 приведены наиболее репрезентативные результаты.

Распределение загрязнения данного типа в подземном потоке в целом определяется положением точки наблюдения относительно источника. Абсолютные максимумы концентрации обнаружены непосредственно вблизи ТЭЦ и главного корпуса (скв. 53, 102, 1003), а также вдоль фильтрационной аномалии вплоть до контура дренирования (скв. ба, 2012). Наиболее устойчивым в процессе фильтрации оказалось сульфатное мыло, наименее — оба вида окисляемости, лигнин и нефтепродукты. Несмотря на высокое в целом содержание веществ на «входе» в подземный поток, на «выходе» (скв. 2011) устойчиво фиксируется уровень, близкий ПДС либо ниже него. Более того, метанол, лигнин, СПАВ, фурфурол и формальдегид вообще отсутствуют, сохраняясь лишь в зоне выклинивания потока за границей промплощадки (скв. 4).

Таблица 3

## Специфические компоненты химического состава по данным нерегулярного гидрогеологического мониторинга в 1992–2013 гг.

Скважина	Содержание компонентов, мг/л									
	окисляемость, мгО/л		лигнин	сульфатное мыло	метанол	СПАВ	фурфурол	фенол	формальдегид	нефтепродукты
	ОП	ХПК								
4	4,2	114	3,5	0,58	0	0,08	0,06	Следы	0,61	0,03
ба	6,8	27	0	1,36	0	0,02	0	0	0	0,02
53	144	580	2,9	5,4	0,4	0,03	0,63	0,001	0,06	11,5
55	1,3	6,1	1,1	0,57	0,07	0,03	1,05	0	0,08	0,80
102	1160	218	340	11,3	Следы	0	0,03	Следы	0,04	0,12
1003	530	1080	300	1,97	0,58	0,1	0,08	»	0,51	5,32
2011	1,4	10	0	0,40	0	0	0	0,005	0	0,06
2012	27	150	0,47	3,14	0	0,06	0,06	0,018	0	0,17
ПДС	—	4,9	2	0,1	0,1	1·10 <sup>-4</sup>	0,01	0	0,1	0,03

Концентрация микроэлементов и специфических компонентов тесно и прямо связана с величиной минерализации и общим химическим составом подземных вод, поэтому и для них характерна сезонная цикличность.

**Тепловое загрязнение.** Производство целлюлозы сопряжено не только с высоким водопотреблением. Выпарной, варочный и сушильный цеха крайне энергозатратны. Прогрев и потери из технологических сетей приводят к тепловому загрязнению подземных вод, развивающемуся на довольно высокотемпературном локальном фоне (в 3–4 раза выше естественного), сформированном вследствие теплопотерь из лежащих выше по потоку объектов. Собственно на промплощадке вполне определенно можно выделить три аномальных участка (рис. 3). Наибольший формируется под воздействием сушильного цеха. В центре аномалии температура доходит до 37 °С, а на границе — до 15 °С. Небольшая по размерам, но наиболее контрастная аномалия сопряжена с ТЭЦ. Температура в центре достигает 50 °С, быстро снижаясь к периферии до 20 °С. Третья аномалия имеет иную природу. Она сформирована теплопотерями из отвала коры, в котором происходит интенсивное окисление органики. Контрастность аномалии невелика, но вполне достаточна, чтобы не слиться с соседними.

На контуре дренирования температура воды соответствует локальному фону, что обеспечивает существование в холодное время года пропарин (1,6 °С) на окончании самой большой термоаномалии. По сравнению с химическим составом воды температурный режим не столь изменчив во времени и по глубине. Дискретный термокаротаж отмечает медленное и незначительное снижение температуры по мере увеличения глубины. Относительная устойчивость температурного режима связана, скорее всего, с регулирующей теплоотдачей прогретых водовмещающих пород.

Химическое и тепловое загрязнение подземных вод проявилось вскоре после начала эксплуатации БЦБК в 1966 г. Первые сведения о неблагополучии датированы 1972 г., когда между ТЭЦ и главным корпусом был обнаружен гидрогеодинамический купол с превышением над базовой поверхностью подземного потока до 7 м. Системные гидрогеологические исследования показали, что загрязнение на промплощадке развивается под влиянием двух главных факторов: комбинированной эмиссии и сложно построенного в пространстве фильтрационного поля. Сравнительно небольшие размеры промплощадки и короткий путь фильтрации подземного потока от места входа загрязнения до его выхода на контуре питания обеспечивают ускоренное передвижение контура загрязнения и контрастность гидрогеохимических границ. Глубина проникновения загрязнения по формальным признакам оценивается в 70 м. Есть все основания считать, что эта величина завышена. Такое заключение основано на быстром затухании фильтрационных свойств с глубиной и конструкционной особенностью скважин, в которых длина рабочей части фильтровой колонны равна вскрытой мощности зоны насыщения. Сочетание двух обстоятельств приводит к искусственному нисходящему перетеканию загрязненных вод по стволу с последующим медленным движением по пласту. Благодаря этому и наблюдается рукотворная гидрогеохимическая инверсия.

Важнейшую особенность режима подземных вод, сохраняющуюся и при работе дренажной системы, представляет собой внутригодичная изменчивость их качественного состояния, которая заключается в глубоком опреснении воды в теплый период. На фоне стабильного производства наблюдаемое явление обусловлено ритмично действующим фактором: инфильтрацией гидromеторов величиной 750 мм/год через

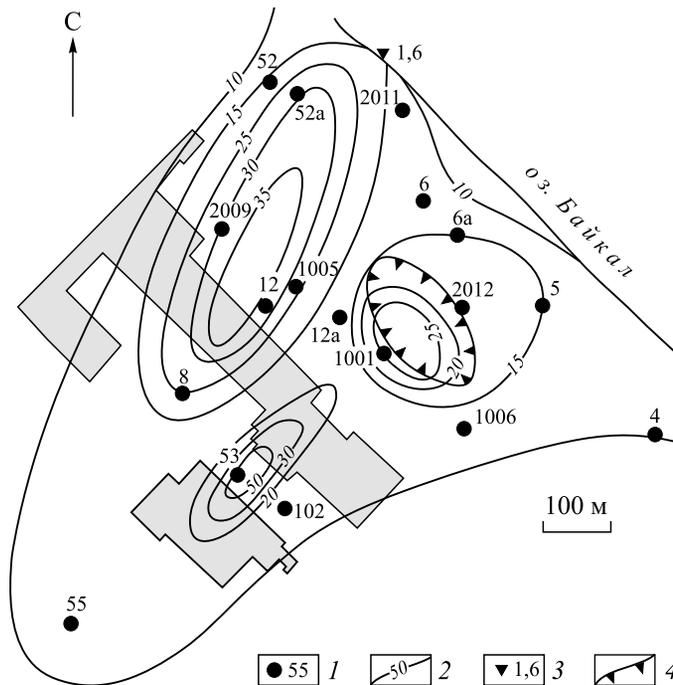


Рис. 3. Гидрогеотермическая структура подземного потока при его максимальной температуре.

1 — наблюдательная скважина; 2 — гидрогеотермы, °С; 3 — температура воды в пропарине на урезе озера, °С; 4 — внешние границы отвала коры.

маломощную хорошо проницаемую зону аэрации. Транзитный сток осуществляет поршневое вытеснение постоянно, но его потенциал по сравнению с атмосферными осадками невелик, и его хватает лишь на то, чтобы переместить максимум минерализации к контуру дренирования.

Основной результат совокупного воздействия инфильтрационного питания и поршневого вытеснения — опреснение и вынос загрязняющих веществ за пределы водоносного горизонта максимум за 6–7 месяцев. Из этого следует, что реабилитация горизонта после прекращения производства до экологически приемлемого уровня произойдет в течение одного года. Правда, остается ТЭЦ, но ее вклад сравнительно невелик и представлен главным образом сульфатом, ванадием, бором и нефтепродуктами, которые рассеиваются, не доходя до контура дренирования.

Тепловое загрязнение локально сохраняется лишь в зоне ответственности ТЭЦ. Если будет осуществлена ликвидация золошлакоотвалов, то понизится температура локального фона, т. е. в Байкал будет поступать подземная вода с температурой, существующей в селитебной зоне.

В результате выполненного исследования допустимо сделать следующий вывод: ликвидация БЦБК приведет к быстрому возврату качественного состояния подземных вод до уровня локального гидрогеохимического фона. Поэтому ущерб оз. Байкал приблизится к нулевому значению, так как даже при работе БЦБК по полной программе максимальная концентрация подавляющего числа ингредиентов загрязнения в большинстве своем была равна или незначительно превосходила ПДС. Что же касается характера рассеивания подземного стока в акватории Байкала и суммарного количества загрязнения, то первый показатель превосходит по ширине выпуск очищенных сточных вод многократно, а по истечению — несопоставимо.

В то же время воздействие действующего объекта (ТЭЦ) вряд ли сколько-нибудь заметно повлияет на уровень локального фона хотя бы потому, что с ликвидацией БЦБК энергетическая мощность существенно снизится. С переходом на газ экологический ущерб подземным водам будет и вовсе ничтожным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Территориальное** развитие г. Байкальска и его пригородной зоны / Ред. А. Н. Антипов. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2003. — 191 с.
2. **Роговин З. А., Шорыгина Н. Н.** Химия целлюлозы и ее спутников. — М.; Л.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит-ры, 1953. — 678 с.
3. **Государственный** доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2007 году». — Иркутск: Изд. Сиб. филиала «Росгеолфонд», 2008. — 443 с.

*Поступила в редакцию 28 августа 2015 г.*