

УДК 504. 054

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗ. БАЙКАЛ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИМИ АРОМАТИЧЕСКИМИ УГЛЕВОДОРОДАМИ

© 2013 г. А.М. Никаноров*, С.А. Резников*, А.А. Матвеев*,
В.С. Аракелян*, Н. Ирха**, У. Кирсо**, Л. Пальме**

*Государственное учреждение Гидрохимический институт

**Институт химии АН Эстонии

Поступила в издательство 16.07.2010 г.

В статье приведены результаты выполненных в 1981–1988 гг. исследований содержания бенз(а)-пирена и других полициклических ароматических углеводородов в оз. Байкал. Изучалось распространение содержания загрязнений в поверхностном слое донных отложений озера в районе сброса сточных вод БЦБК, а также в сточных водах комбината и в озерной воде. Обнаружено, что содержание бенз(а)пирена на дне исследуемого участка, в сточных водах комбината и в озерной воде нередко значительно превышало нормируемые показатели качества природной среды и природный фон озера. Ранее эти данные не могли быть опубликованы из-за существовавших ограничений.

Введение. Комплексный мониторинг состояния окружающей природной среды бассейна озера Байкал осуществлялся Росгидрометом с 1969 г. после ввода в строй в 1967 г. Байкальско-го целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК). К концу 1970-х годов на Байкале была сформирована эффективная научно-обоснованная и практически апробированная сеть станций наблюдений, створов, полигонов, позволяющих получать достаточно полную информацию о состоянии поверхностных вод, атмосферных выпадений, донных отложений, гидробионтов (включая микробиологические исследования), а также отдельных участков озера, наиболее сильно подверженных антропогенному воздействию: район сброса сточных вод БЦБК, зона воздействия на озеро трассы Байкало-Амурской магистрали и на Селенгинском мелководье (авандельта), куда сбрасывается более 50% всего водного стока в озеро.

Особое внимание в мониторинге озера уделялось району выпуска промышленных сточных вод БЦБК, где сформировались устойчивые зоны загрязнения: до 25 км² в поверхностном слое воды, до 200 км² по данным загрязнения снежного покрова, более 20 км² в донных отложениях (ДО). Зоны антропогенного влияния расположены также на Селенгинском мелководье, на севере озера, вдоль южного побережья от п. Култук до Хара-Мурынской банки.

Максимальное количество отбираемых проб контролируемых районов, определяемых показателей наблюдения за состоянием ДО достигло в период 1970–1990-х годов. В тот период контроль постоянно осуществлялся в трех районах озера: у южного побережья в районе БЦБК, на Селенгинском мелководье, и в зоне влияния строящегося БАМа. В проводимых 2 раза в год съемках пробы отбирались в 105 точках побережья и мелководья. Отбор проб осуществлялся дночерпателем типа “Океан” с площадью захвата ДО в 0.75 м².

Наряду с традиционными ингредиентами в составе ДО определялись: органический углерод, азот, сера сульфидная, в каждой же пробе иловых вод анализ зафиксировал характерные для сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности вещества, к которым относятся легкогидролизуемые углеводы – гemicеллюлоза, трудногидролизуемые углеводы – целлюлоза, лигниногумусовый комплекс – лигнин, а также растворенный кислород и рН.

Впервые для бассейна озера Байкал в 1981–1988 гг. было проведено исследование полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) и бенз(а)пирена (БП). Ранее эти данные не могли быть опубликованы в связи с действующими ограничениями для открытой печати в Росгидромете. После 1991 г. исследования по изучению

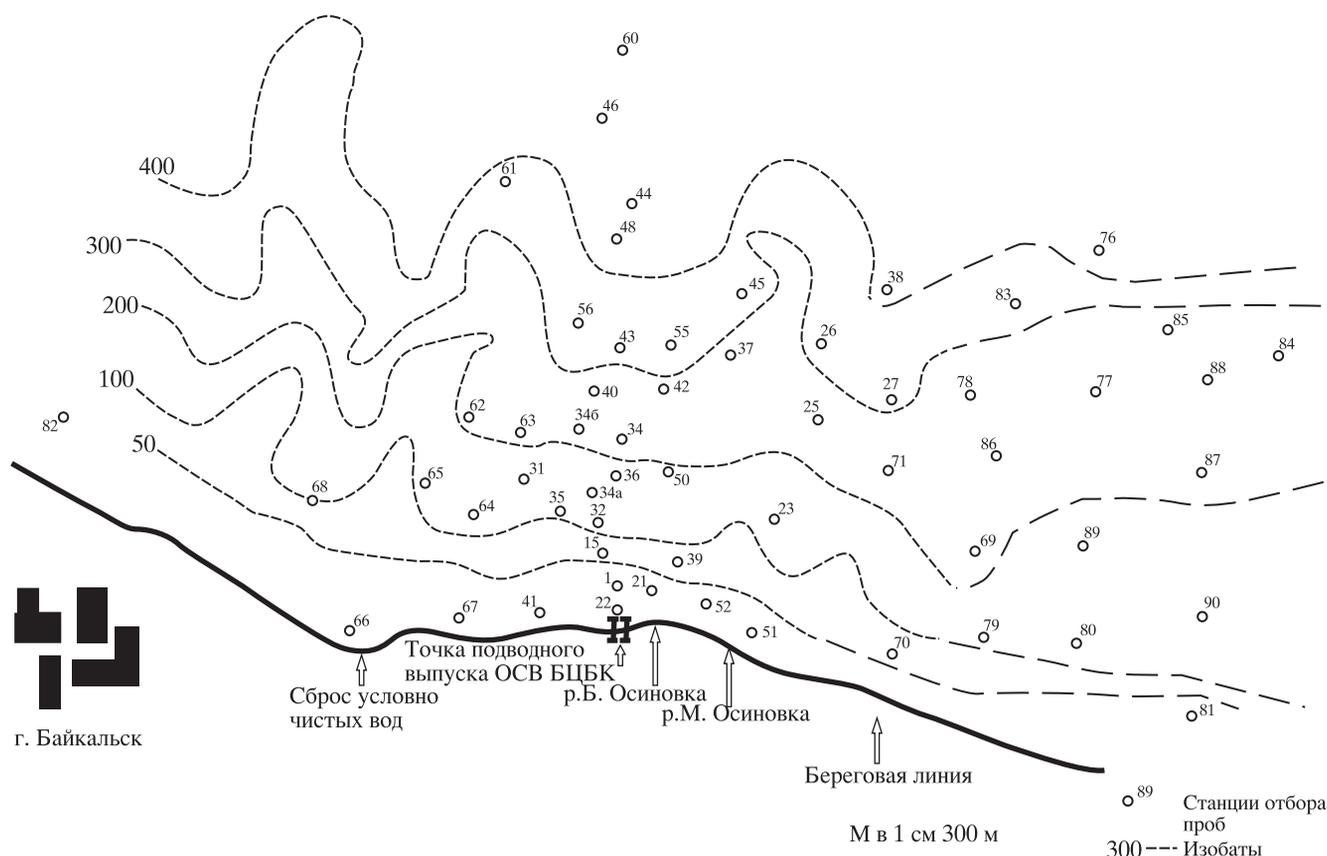


Рис. 1. Схема расположения станций отбора и номера проб донных отложений озера Байкал в районе сброса сточных вод БЦБК

ПАУ на полигонах Росгидромета на Байкале не проводились.

По новой Программе изучения озера Байкал, разработанной Росгидрометом, в 2011 г. подобные исследования будут возобновлены. Проведенные ранее работы будут необходимой основой для продолжения мониторинга канцерогенных соединений на озере.

Цель настоящей работы – показать характер загрязнения воды и донных отложений бенз(а)пиреном и другими ПАУ в районе выпуска сточных вод БЦБК (полигон) и проследить пространственно-временную динамику миграции пятна загрязненных донных отложений. Это важно, поскольку продолжается многолетнее функционирование БЦБК и его негативное влияние на экосистему Байкала.

Объект исследования. Отбор проб верхнего двухсантиметрового слоя ДО проводился 2 раза в год, в подледный период (в марте) и в начале осени (август–сентябрь) на участке (полигоне) площадью до 20 км², примыкающем к выпуску сточных вод комбината в 30–40 точках, располо-

женных радиально от выпуска на глубинах от 20 до 500 м. Всего было проведено семь съемок.

Полигон исследования занимал территорию от точки сброса сточных вод комбината в районе устья реки Большая Осиновка – на запад до 4.5 км (ст. 82), на восток к Хара-Муринской банке до 4.2 км (ст. 89) и в сторону озера до 3 км до глубин 400 м. Протяженность участка составила 8.7 км при условной ширине до 3 км. Площадь полигона каждый раз менялась в зависимости от количества назначаемых станций для отбора проб во время съемки (рис. 1).

Геоморфологическое строение полигона достаточно сложное, что отразилось на технике отбора проб дночерпателем, не позволяя достаточно равномерно распределять станции по всей площади дна полигона. Район сброса сточных вод БЦБК расчленен тремя относительно параллельными каньонами с углами падения 30 и более градусов. Течение озерной воды прослеживается вдоль южного побережья Байкала и направлено с юго-запада на северо-восток, что вызывает перераспределение седиментационного материала и с адсорбированным им комплексом загрязняющих веществ в этом же направлении. Как показали

предыдущие исследования, проведенные ГХИ, концентрирование загрязняющих веществ, таких как тяжелые металлы, хлорорганические пестициды, БП, в донных отложениях полигона происходило в основном в восточной части полигона, морфологически ограниченном Хара-Муринской банкой, что способствовало перманентному повышению степени техногенной нагрузки на донные отложения этой части озера. Однако определенная часть БП концентрировалась в западной прибрежной части полигона, куда сбрасывались в виде постоянно действующего ручья условно чистые воды с территории комбината до 1989 г. (рис. 1).

Донные отложения на полигоне представлены всем набором литологических типов от крупнозернистых отложений – гальки до мелкоалевритовых илов. По данным [10], в южной части Байкала отсутствует классическая схема дифференциации осадочного материала по дну озера по гидравлической крупности обломочных частиц. Основные причины этого: каньонообразное строение рельефа дна, резкий свал глубин, гравитационное скольжение отложений, механическое их смещение, приводящее к сползанию последних по склонам каньона. К сползанию ДО приводит также повышенная сейсмичность байкальского региона. Общая картина расположения литологических типов донных отложений представляла собой сложную мозаичную структуру, где грубозернистые отложения могли располагаться среди тонкозернистых илов в виде пятен, что приводило к отсутствию упорядоченности в концентрировании веществ в литологическом профиле полигона.

Глубинный рассеивающий выпуск сточных вод комбината осуществляется через два параллельных трубопровода, которые находятся на глубинах 12–22 и 33–42 м и ориентированы в юго-восточном направлении. Помимо гидродинамического (волнового) воздействия на разнос этого (техногенного) материала, а также на транзит и седиментацию последнего влияет сложная система разнонаправленного подводного течения. Разбавление сточных вод на расстоянии 100 м от оголовка трубы, выпускающей сточные воды, было 20-кратное, на расстоянии 3–4 км от выпуска разбавление достигало 100.

Как показали исследования придонного слоя воды на полигоне с помощью аквалангистов, сточные воды комбината, консолидируясь, представляли собой так называемый нефелоидный слой с различной мощностью до 1 м, который прикрывает (обволакивает) углубления в неровностях рельефа дна на глубинах более 30 м. В дальнейшем этот слой мигрирует на большие глубины, на

что указывало содержания ПАУ (БП) на глубинах более 200 м.

Результаты комплексных литогеохимических исследований на ряде озер РФ показывали на приуроченность максимальных концентраций тяжелых металлов, минеральных, органических веществ, а также ПАУ к определенным районам водоемов, где аккумулируются ДО с максимальным содержанием глинистых (пелитовых) частиц [13, 14]. Известно, что взвешенное вещество, а в дальнейшем глинистые частицы (минералы) донных отложений сорбируют загрязняющие вещества. Но на полигоне в районе БЦБК распределение и аккумуляция осадочного (антропогенного происхождения) материала имело иной литодинамический характер.

На сложный механизм аккумуляции осадочных веществ (с адсорбированным комплексом сложных органических соединений) в донных отложениях морей в случае постоянного поступления больших масс седиментационного материала указывает работа [12] – “зависимость (распределения углеводородов от гранулометрического состава донных отложений) нарушается в области лавинной седиментации и в местах массивированного поступления нефтепродуктов”, поэтому илистые осадки могут быть загрязнены даже в меньшей степени, чем песчаные. Интенсивный и постоянный подводный выпуск сточных вод комбината в озеро можно рассматривать как техногенную лавинную седиментацию.

В качестве условного фонового района показали которого должны были быть менее всего подвержены антропогенному фактору, был выбран район авандельты р. Безымянная. Здесь синхронно с проведением съемок в районе БЦБК отбирались пробы ДО в диапазоне глубин 20–400 м.

Для выделения участков накопления загрязняющих веществ в ДО в пределах полигона его площадь была разделена по глубинам на две части, различающиеся по литолого-морфологическим особенностям: прибрежные отложения – разнозернистые пески и крупноалевритовые илы, обычно располагающиеся на глубинах до 100 м, и глубоководные отложения – мелкоалевритовые и реже глинистые илы на глубинах более 100 м. Каждая литологическая разновидность донных отложений рассматривалась отдельно в западной и восточной частях полигона относительно места выпуска сточных вод.

В СССР из всех ПАУ только БП был сертифицирован для обязательного контроля его содержания в почве, воде и воздухе. В гидросфере фоновое содержание БП оценивается 0.1 нг/л, его

Таблица 1. Шкала сравнительных оценок загрязнения ДО внутриконтинентальных водоемов по БП, мкг/кг [9]

Литологический тип ДО	Фон	Умеренное загрязнение	Сильное загрязнение
Пески	2	2–5	>5
Илы	5	5–30	>30

ПДК в почве – 20 мкг/кг. Существуют несколько классификаций и оценок, отражающих фоновый уровень БП в биосфере, степень загрязнения объектов внешней среды БП [1, 18]. Степень загрязненности донных отложений еще можно оценить с достаточной долей условности, используя СП 11-102-97 [15], где приведены так называемые допустимые уровни концентрации (ДК) и уровни вмешательства (УВ) для целого ряда загрязняющих веществ в ДО в соответствии с зарубежными нормами, в которых ДК для суммы ПАУ составляет 1000 мкг/кг, а УВ – 40000 мкг/кг. Из восьми проанализированных проб на полигоне на содержание в них суммы ПАУ только в одной пробе (№ 41) сумма полиаренов превышала уровень в 1.48 ДК. Однако следует согласиться с мнением Л.И. Белых и др., что уникальность озера дает основание относиться с осторожностью к известным системам оценок загрязнения водоемов канцерогенными ПАУ [3]. В нашей работе была принята шкала сравнительных оценок загрязнения ДО внутриконтинентальных водоемов по БП, разработанная в Институте химии АН ЭССР М.А. Трапидо, в 1985 г., которая была внедрена ГХИ при изучении БП на озере Байкал, а также на Ладожском, Онежском и других озерах, Аральском море [16] (табл. 1).

Генезис поступления ПАУ в экосистему озера Байкал мог быть различным: многочисленные выходы нефтяных углеводородов на дне Байкала, аэрозоли, образующиеся в результате сжигания топлива в Иркутском регионе, водный транспорт, а также биохимическое образование ПАУ при деструкции органического вещества. В данном исследовании вопрос о происхождении БП на полигоне не рассматривался. Непосредственно на полигоне один из основных источников поступления данного арена известен: это сточные воды комбината. Образование ПАУ происходит в результате сульфат-целлюлозного производства при термической обработке древесины [5, 6, 9]. По данным [7], на примере Сясьского целлюлозно-бумажного комбината на Ладожском озере микрочлора аэротенков не разрушает БП. Концентрация БП в воде аэротенков может снижаться за счет адсорбции активным илом неизменного канцерогена. Только озонирование способно эффективно разрушать ПАУ, на БЦБК этот процесс

отсутствует [4]. Вследствие слабой растворимости ПАУ в воде полиарены могут накапливаться в донных отложениях и гидробионтах. Низкая степень деградации ПАУ, высокая их химическая устойчивость, а также высокий коэффициент концентрирования в системе вода – ДО могут приводить к вторичному загрязнению водной толщи за счет поступления этих веществ из ДО при определенных гидрохимических условиях.

Коэффициент донной аккумуляции – КДА (фактор концентрирования) в районе БЦБК, рассчитанный как отношение содержания БП в ДО к его содержанию в воде, составлял 100–10000 [8]. Такие значения КДА были обусловлены низкими концентрациями БП в воде и значительным содержанием последнего в донных отложениях, что свидетельствовало о многолетнем перманентном загрязнении водного объекта. Следует отметить, что многие органические и неорганические соединения, такие как соединения фенолов и др., характерные для сточных вод комбината, усиливают канцерогенный потенциал БП и других ПАУ [19].

Методика исследований и обсуждение результатов. Анализ ПАУ проводился методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с помощью прибора “Perkin Elmer 3В HPLC” с УФ- и флуоресцентными детекторами.

Определение ПАУ проводилось в 1981 г., 1984 г., 1985 г., 1986 г., сентябре 1988 г. Отбор проб осуществлялся Иркутским УГМС. Во всех пробах ДО определялся БП, а в ряде проб – все полиарены, что позволило идентифицировать 16 ПАУ. Всего было проанализировано 233 пробы ДО, 45 проб озерной воды, 12 проб сточных вод комбината.

Участки полигона, на которых проявлялось сильное загрязнение, определялись путем сравнения величин индекса загрязненности (ИЗ) каждой точки отбора проб с учетом принадлежности ее к различным литологическим типам донных отложений. Индекс определялся по формуле

$$\text{ИЗ} = \sum C_i / C_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где C_i – значение содержания БП в ДО в точке i ; $C_{\text{ср}}$ – среднее значение БП по полигону (а также

Таблица 2. Содержание ПАУ в пробах №№ 39, 41, 46, 52, 66, 78 ДО оз. Байкал, отобранных в районе БЦБК в марте 1985 г. и в пробах №№ 1, 34а, отобранных в марте 1984 г. (мкг/кг)

Соединение	Номера станций							
	Март 1984 г.		Март 1985 г.					
	№ 1	№ 34а	№ 39	№ 41	№ 46	№ 52	№ 66	№ 78
Бенз(а)антрацен	–	12.5					12.5	
Бенз(в)флюорантен			6.6	10.6		19.8	10.4	
Хризен	47.5		62.7	187	55.2	229.2	166.4	55
Пирен				15.7	4		10.4	10
Бенз(е)пирен	10.5		227.7	633.6		686.4	582.4	123
Бенз(а)пирен	21	65	17.1	23.8	3.6	37.5	18.3	16.9
Бенз(к)флюорантен	1.5	0.75	0.1	0.3	0.02	0.2	0.2	0.05
Дибенз(а, j)антрацен	277.5		99	108.9			83.2	20.3
Бенз(j, h, i)перилен	57	2.25		496.9	30			81.3
Дибенз(а, i)пирен	0.45		Следы	Следы	Следы	Следы	Следы	Следы
Дибенз(а, h)пирен	1.05		»	2.2	0.2	1	1	0.3
Перилен	19.5	2.5						
Дибенз(а, h)антрацен	12							
Антантрен								
Дибенз(е, i)пирен	75	Следы						
Коронен								
Сумма	523.0	85.5	413.2	1479.0	93.0	974.1	884.8	306.8
Содержание бенз(а)пирена, %	4.4	78.3	4.1	1.6	3.9	3.8	2.1	5.5

среднее фоновое значение для полигона, ПДК БП для почвы).

Концентрации БП в сточных водах комбината были близки: в двух пробах 1981 г. составляла 4.33 и 1.66 нг/л, а средняя концентрация, рассчитанная по 10 пробам, отобранным в 1984 г., составила 2.13 нг/л при размахе величин 0.9–4.6 нг/л. Все отмеченные содержания БП не превышали ПДК для питьевой воды (5 нг/л), но они были в 9–46 раз выше фонового уровня концентраций для пресноводных водоемов (0.1 нг/л). Представленные результаты могут указывать, что одним из основных источников поступления БП в озеро является комбинат. В 1984 и 1988 гг. в пробах, отобранных в поверхностном слое воды озера на расстоянии 1–1.5 км от выпуска сточных вод, содержание БП в среднем составило 0.67 нг/л, на расстоянии 3–5 км – 0.29 нг/л, а на расстоянии 13–20 км БП не обнаруживается (ниже чувствительности метода).

Результаты химического анализа поверхностного слоя озерной воды в районе полигона показали на значительные колебания концентраций БП в отдельные периоды наблюдений. В 1981 г. содержание БП колебалось от следов до 8.96 нг/л, среднее значение – 3.31 нг/л. В 1984 г. – соответственно 0.15–2.93 нг/л, среднее – 0.59 нг/л, в

1986 г. – от следов до 4.5 нг/л, среднее значение 1.43 нг/л.

Методом жидкостной хроматографии в пробах воды и ДО озера идентифицировано 16 представителей ПАУ. Кроме бенз(а)пирена в пробах ДО были идентифицированы следующие соединения: бенз(е)пирен, хризен, дибенз(а, j)антрацен, бенз(а)антрацен, перилен, бенз(в)флюорантен, бенз(к)флюорантен, дибенз(а, h)антрацен, бенз(д, h, i)перилен, антантрен, дибенз(е, i) пирен, дибенз(а, i)пирен, дибенз(а, h)пирен, каронен, пирен, дибенз(а, е)пирен (табл. 2)

Основную долю полиаренов в воде озера составляли трехядерные ПАУ, которые не представляют большой опасности из-за их низкой физиологической активности. В работе представлены данные по содержанию четырех и более ядерных ПАУ. В пробах ДО наблюдалась тенденция к накоплению во времени более тяжелых гомологов: шести- и более ядерных ПАУ – дибенз(а, j)антрацена, бенз(е)пирена и др. Суммарное содержание этих 4-х и более кольцевых ПАУ, включая БП, колебалось на полигоне от 85 до 1480 мкг/кг. На долю первых трех аренов указанного ряда и БП приходилось более 70% от общей суммы ПАУ.

Содержание БП в ДО полигона колебалось от 0.2 до 95.9 мкг/кг, максимальные содержания БП

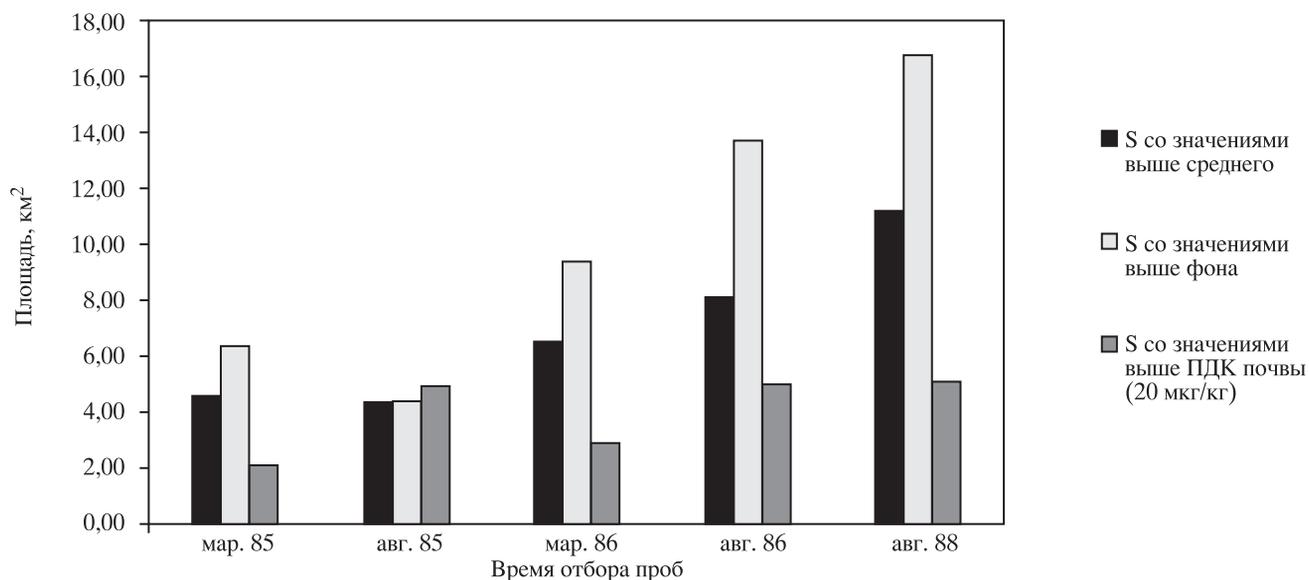


Рис. 2. Площади зон загрязнения в донных отложениях озера Байкал в районе выпуска сточных вод БЦБК по содержанию бенз(а)пирена выше среднего значения на полигоне, выше фонового значения для полигона, выше ПДК почвы.

(в пределах 50 мкг/кг и более) в проанализированных пробах являлись частыми величинами, поэтому среднее значение БП по съемкам можно считать приемлемым. БП был обнаружен в ДО в значительных концентрациях на расстоянии до 3 км от выпуска сточных вод комбината, что подтверждает высокую устойчивость арена к физико-химическому и микробиологическому воздействию со стороны донных отложений. Площади

пятна загрязненных ДО представлены в табл. 3 и на рис. 2.

Фактор изменчивости, рассчитанный как отношение максимальных содержаний БП к минимальным значениям, в среднем составлял 181 при наибольшем значении 479.5, что указывало на значительное влияние антропогенного фактора. На фоновом участке полигона был сравнительно небольшой разброс величин этого фактора,

Таблица 3. Характеристики загрязнения полигонов БП по различным критериям и средние значения БП на фоновых

Характеристики	1981, август	1984, март	1985, март	1985, август	1986, март	1986, август	1988, сентябрь
Площадь полигона, км ²	—	9.3	17.7	15	17.9	20.3	20.1
Общее количество проб	9	20	37	35	35	41	40
Интервал значений	4.1–43.1	0.2–65.2	0.3–48.3	0.2–95.9	0.5–34.6	0.5–40.5	3.0–59.7
среднее значение (мкг/кг)	18.2	7.4	9.1	24.7	10.6	15.7	18.6
Площадь загрязнения по превышению среднего значения, км ² (% от площади полигона)	—	2.2(23.6)	5.3(29.9)	5.9(39.3)	7.1(39.6)	8.5(41.9)	7.3(36.3)
Площадь загрязнения по превышению фона, км ² (% от площади полигона)	—	—	7.2(40.7)	5.9(39.3)	11.4(63.7)	14.9(73.4)	18.4(91.5)
Площадь загрязнения по превышению ПДК почвы, км ² (20 мкг/кг) (% от площади полигона)	—	0.5(5.4)	2.6(14.7)	6.9(46)	2.9(16.2)	6.7(33)	5.2(25.9)
Среднее значение на фоновых станциях (мкг/кг)	—	—	5.7	22.6	7.2	4.4	3.7

* Не определялось

Таблица 4. Содержание БП в поверхностной воде ДО оз. Байкал на полигоне БЦБК (числитель – среднее значение, n – число проб; знаменатель – интервал значений, n – число проб)[3]

Место отбора проб	Вода, нг/л	ДО, мкг/кг	КДА
Место сброса (м.с.) сточных вод	$\frac{6.1(n=2)}{3.2-9.0}$	$\frac{25(n=5)}{12-43}$	4.0×10^3
Напротив м.с.	–	$\frac{15(n=4)}{5-32}$	
50 м восточнее м.с	–	$\frac{32(n=4)}{6-68}$	
100 м восточнее м.с.	–	$\frac{15(n=4)}{9-24}$	
300 м южнее м.с.	1.1	$\frac{12(n=4)}{4-23}$	1.1×10^4
5 км южнее м.с.	–	$\frac{14(n=4)}{12-15}$	

который находился в пределах 1–7.5, что можно считать “природным” современным фоном. При составлении профиля ПАУ (отношения отдельных аренов к концентрации БП) нельзя было выделить определенный источник их эмиссии. На существование различных источников загрязнения в районе БЦБК также указывало увеличение средних содержаний БП от подледного периода наблюдений (март) к послепагодковому периоду (август) с 9.0 до 19.1 нг/г, а также сопоставимость средних значений для каждого периода наблюдений (табл. 3). Повышенные содержания БП в летний период могли являться результатом поверхностного смыва.

Для определения сезонных изменений концентраций БП ДО было проведено изучение проб, отобранных в марте и августе 1985 и 1986 гг. В марте 1985 г. средняя концентрация БП из 37 проб составила 9.1 нг/г при размахе величин 0.3–48.3 нг/г, площадь пятна загрязненных ДО, выделенных по превышению фона (район реки Безымянной), составила 7.2 км² (40.7% площади полигона). В августе 1985 г. химический анализ показал значительное увеличение средней концентрации до 24.9 мкг/кг при размахе 0.2–95.9 мкг/кг, площадь пятна загрязненных ДО составила 5.9 км² (39.3% площади полигона). В марте и августе 1986 г. соответственно были отмечены следующие параметры: 10.3 мкг/кг, 0.5–34.6 мкг/кг, площадь пятна 11.4 км² (63.7%) и 15.2 мкг/кг, 0.5–40.5 мкг/кг, площадь пятна 14.9 км² (73.4%). В период ледостава при ослабленном гидродинамическом режиме на озере происходило более тесное (сгруппированное) накопление повышенных содержаний БП на дне полигона вблизи глубинного выпуска сточных вод, но ситуация менялась в период открытой воды (рис. 3, 4).

Максимальные содержания БП в ДО были приурочены к участкам полигона до глубин 100 м, где развиты в основном песчаные отложения (рис. 5), а также был отмечен рост содержаний БП за время наблюдений на озере.

Площадь пятна загрязненных донных отложений, определенная по превышению среднего содержания БП, достигала 41.9%, по превышению ПДК БП в почвах она варьировала от 13 до 45% площади полигона.

Изменение конфигурации распределения БП на полигоне в летнее время, когда площадь максимального загрязнения выстраивалась по конфигурации береговой линии, связано с поверхностным смывом из почвы и с других поверхностей санитарно-защитной зоны комбината (рис. 3 и 4). Обычно радиус зоны загрязнения БП вблизи промышленного комплекса не превышает 30 км от окраины промзоны [17]. Снежный покров на озере в подледный период, а также на его побережье является активным аккумулятором БП.

Верховодка проявляется на территории комбината на глубинах 4–25 м. Под влиянием инженерно-хозяйственной деятельности она также подвергалась комплексному загрязнению с образованием техногенных куполов. Минерализация подземных вод в районе БЦБК увеличилась в 15 раз после запуска БЦБК. В береговой зоне озера подземные воды выходят на поверхность, их можно считать еще одним источником загрязнения озера, включая ПАУ [2].

Полученные материалы по БП в ДО полигона в 1981–1988 гг. сопоставимы с более поздними данными 1997 г., приведенными в работе [3] (табл. 4).

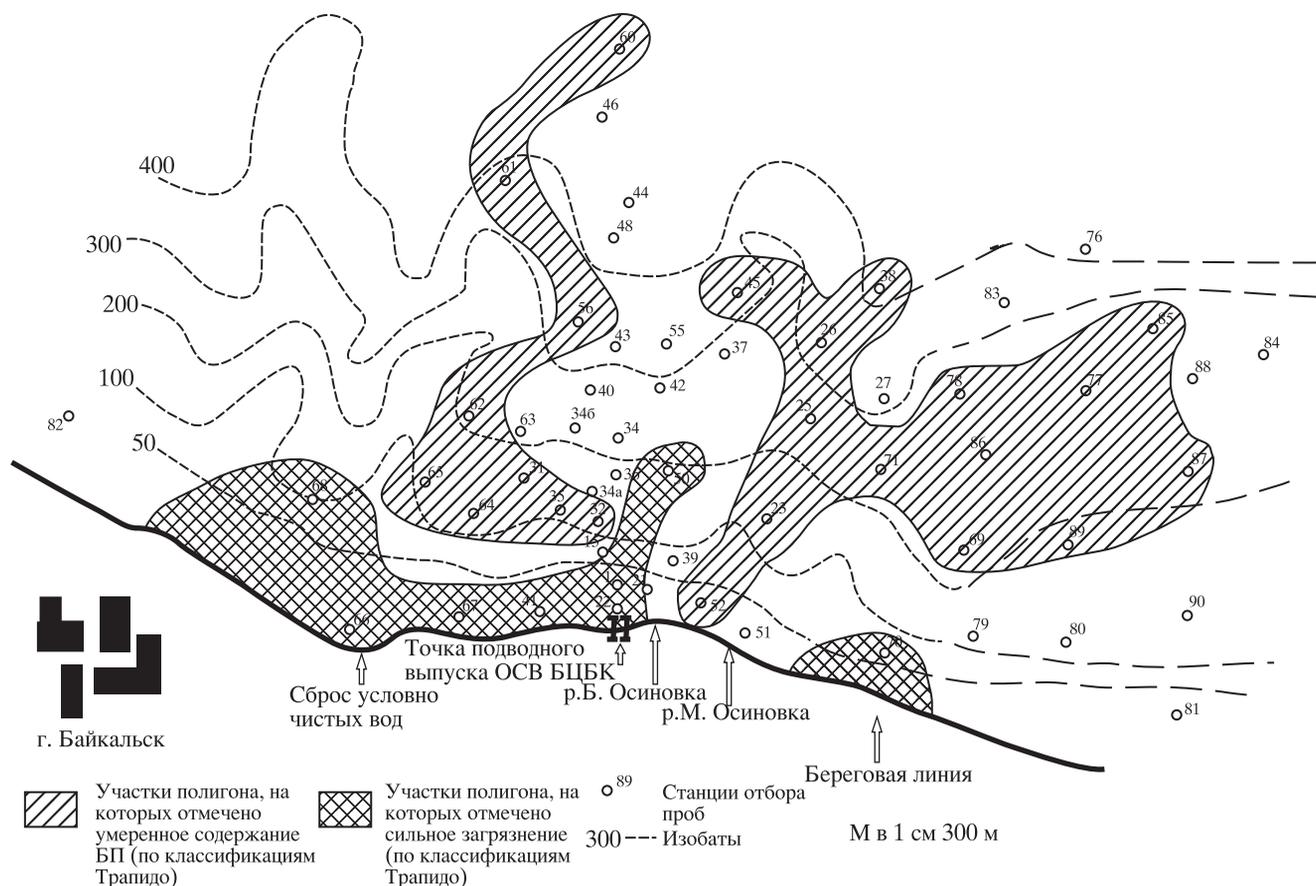


Рис. 3. Картограмма содержания БП в ДО озера Байкал в районе выпуска сточных вод БЦБК в марте 1986 г. с учетом классификации [16].

Между содержанием БП в поверхностном слое воды и в ДО отсутствовала связь, коэффициент корреляции составил 0.18–0.16, что свидетельствовало о существовании другого источника загрязнения ДО. Возможно, сезонное увеличение содержания БП и размеров зоны загрязнения ДО в

послепаводковый период, по сравнению с подледным отбором проб, при относительно устойчивом содержании БП в сточных водах, свидетельствовало о сильном влиянии других пирогенных и/или петрогенных источников загрязнения, связанных с максимальным речным и поверхностным сто-

Таблица 5. БП в песках и илистых отложениях и площади загрязнения, составленные с учетом классификации [16]

	Мар. 1984	Мар. 1985	Авг. 1985	Мар. 1986	Авг. 1986	Сен. 1988
Число проб с умеренным загрязнением в песках (площадь)	нет	1(0.5)	нет	1(0.3)	2(0.7)	2(0.5)
Число проб с умеренным загрязнением в илах (площадь)	2(0.8)	5(2.4)	11(5.7)	6(3.6)	10(5.4)	8(4.1)
Число проб с высоким загрязнением в песках (площадь)	16(8)	16(14.2)	15(7.6)	18(9.6)	18(9)	27(13.5)
Число проб с высоким загрязнением в илах (площадь)	1(0.5)	нет	4(1.8)	1(0.6)	1(0.5)	3(2)

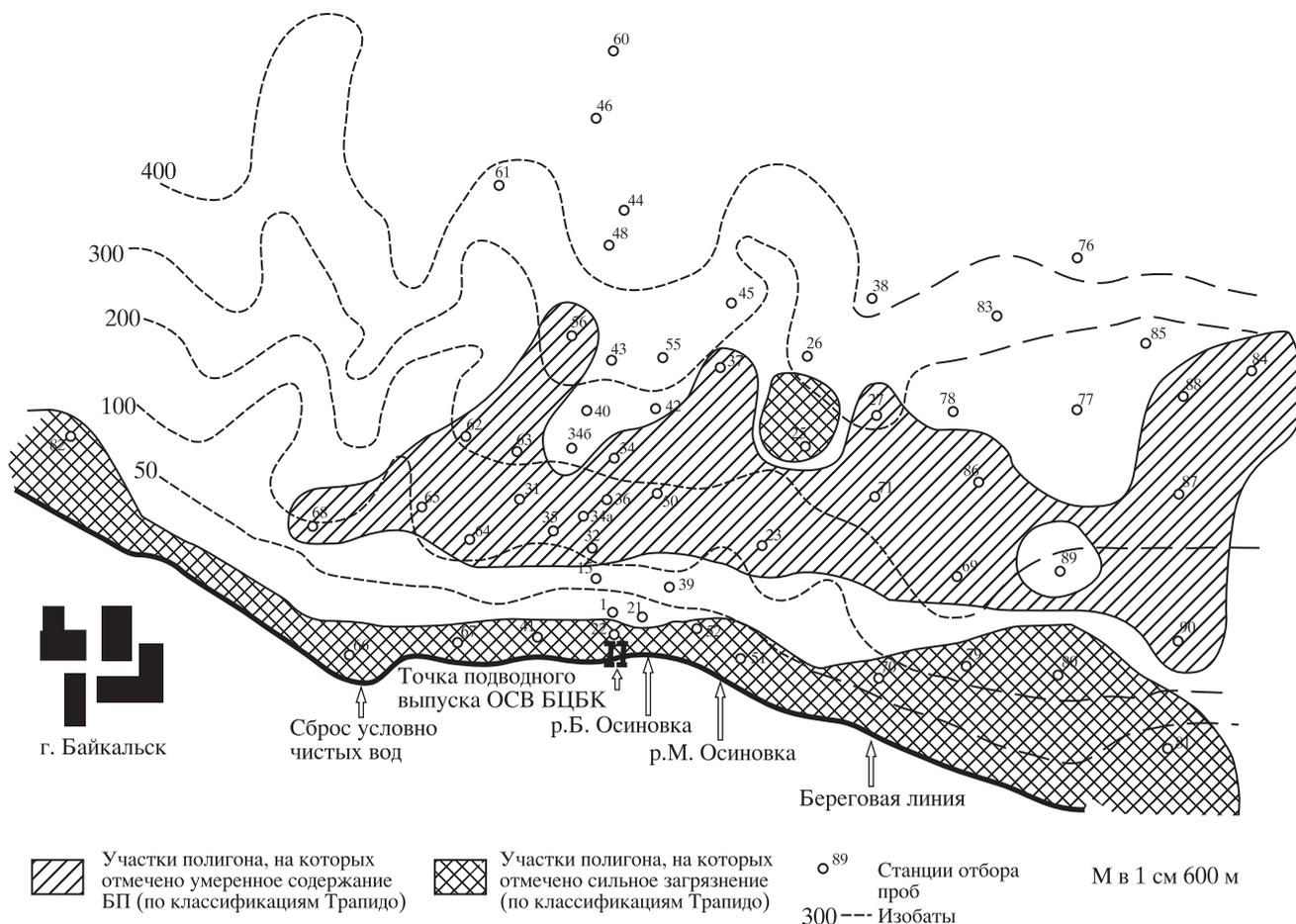


Рис. 4. Картограмма содержания БП в ДО озера Байкал в районе выпуска сточных вод БЦБК в августе 1986 г. с учетом классификации [16].

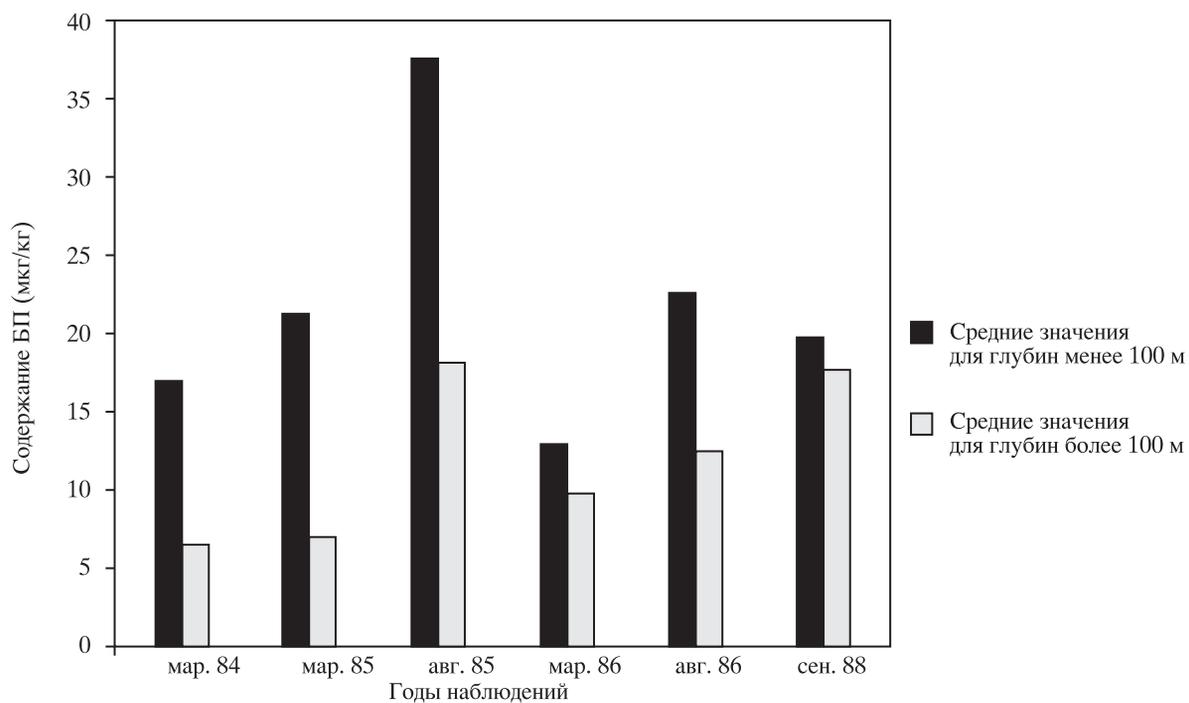


Рис. 5. Средние значения содержания БП в ДО озера Байкал для глубин менее 100 м (пески) и более 100 м (илы).

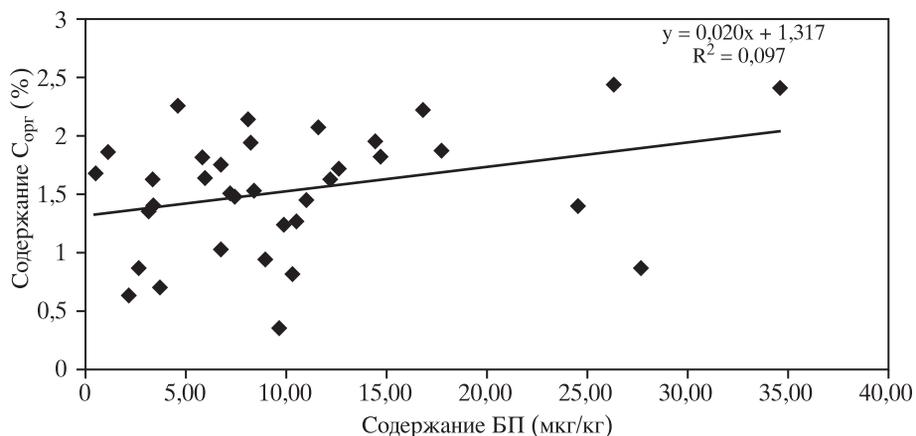


Рис. 6. Связь между содержанием БП в ДО озера Байкал в районе выпуска сточных вод БЦБК в марте и августе 1986 г.

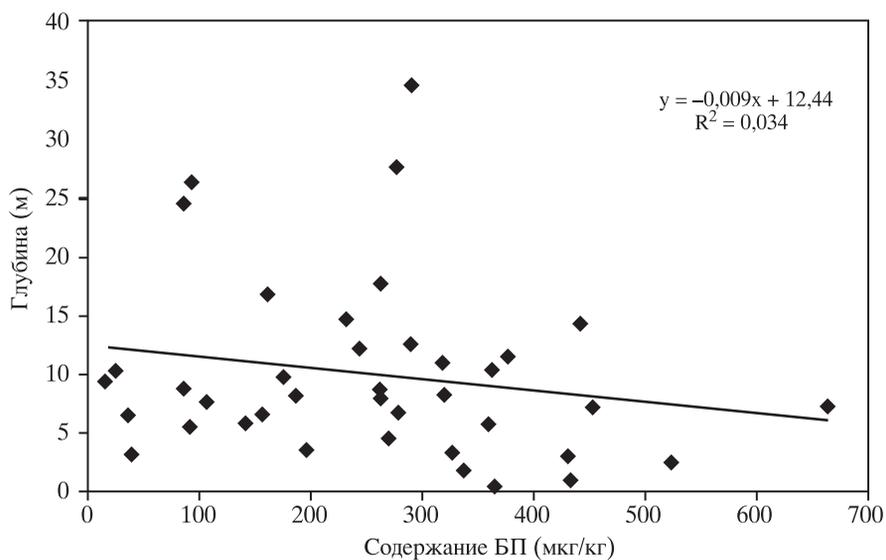


Рис. 7. Связь между содержанием БП в ДО и содержанием $C_{\text{орг}}$ в марте 1986 г.

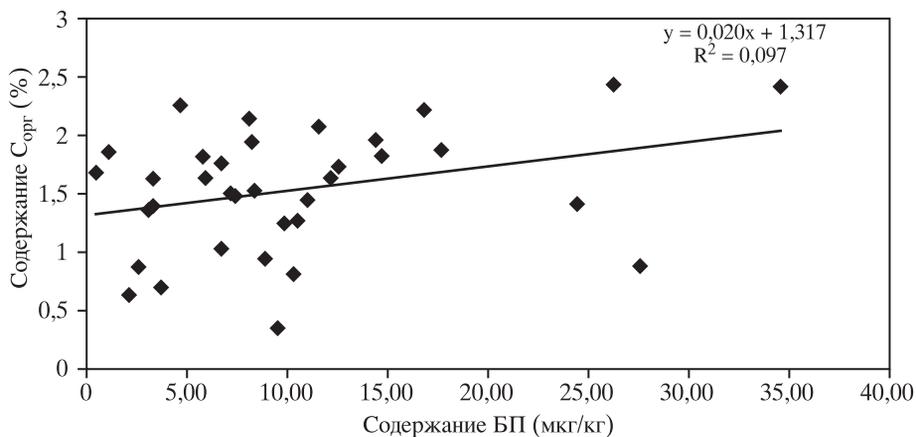


Рис. 8. Связь между содержанием БП в ДО и содержанием кислорода в придонной воде в марте 1986 г.

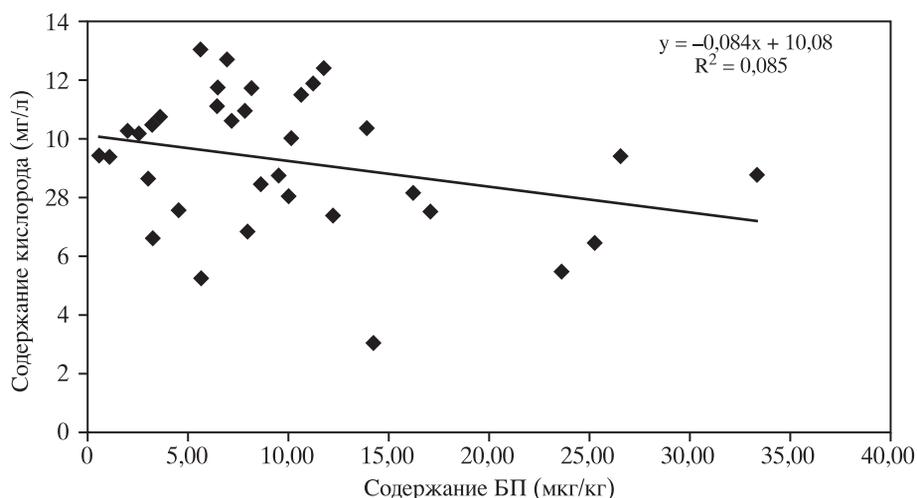


Рис. 9. Связь между содержанием БП в ДО и содержанием пелитовых частиц в марте 1986 г.

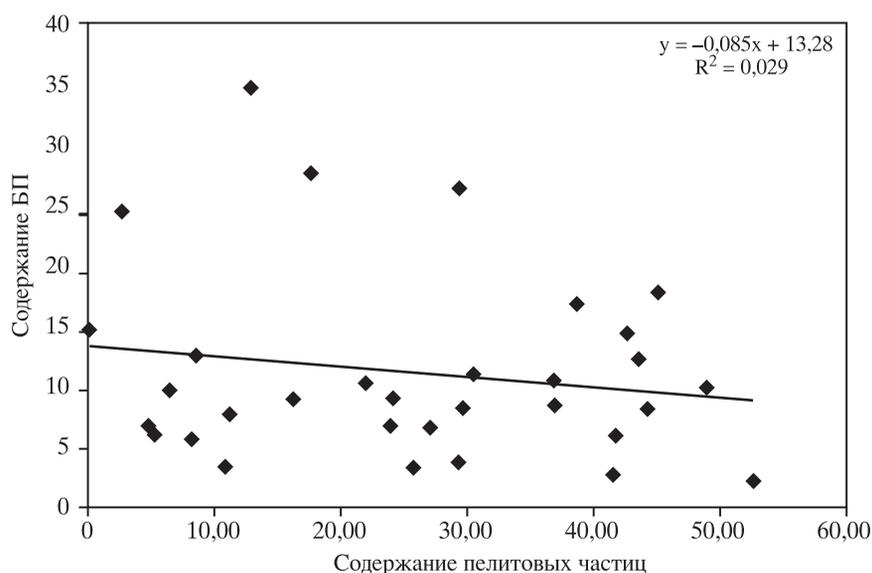


Рис. 10. Связь между содержанием БП в ДО и глубиной отбора проб в марте 1986 г.

ком с селитебной территории, судоходством, атмосферным переносом, с процессом биохимической трансформации и др. (рис. 3, 4).

Корреляционная связь между концентрированием БП в ДО в подледный и открытый ото льда периоды отсутствовала, коэффициент корреляции составлял менее 0.2 (рис. 6). Не было обнаружено сильных связей между содержанием БП в ДО и $S_{орг}$ (рис. 7), БП в ДО и содержанием растворенного кислорода в придонном слое воды (рис. 8), БП в донных отложениях с содержанием глинистой фракции в пробе (рис. 9), БП с глубиной отбора проб (рис. 10). Приведенные данные

подтвердили гипотезу о техногенной лавинной седиментации сточных вод на полигоне.

Считается, что ДО относятся к слабо загрязненным при содержании в них суммы 3–6 кольчатых ПАУ менее 100 мкг/кг [20]. В наших исследованиях по этому критерию донные отложения следует относить к сильно загрязненным (только в двух пробах из восьми содержание ПАУ было меньше 100 мкг/кг). По данным шкалы Трапидо М.А. [16], ДО полигона также являлись сильно загрязненными.

Для сравнения следует отметить, что содержание БП на полигоне в северной части озера Байкал и в авандельтер. Селенга по этой же шкале

[16] характеризовалось фоновыми значениями как для песков, так и илов.

Если содержание БП в воде озера в целом не превышало ПДК, то по ДО загрязнение соответствовало сильно загрязненным районам, где концентрация БП превышала фоновый уровень в несколько раз. Следовательно, контроль за содержанием ПАУ в ДО должен быть одной из первоочередных задач мониторинга.

Содержание БП в ДО составляло от 1.6 до 5.5 % суммарного количества всех идентифицированных ПАУ, а большинство других индивидуальных аренов обладают не менее токсичными свойствами, чем БП, поэтому актуален и мониторинг других индивидуальных полиаренов.

Пятно загрязненных ДО БП на полигоне не было закрытым, так как исследования на глубинах более 500 м по техническим причинам не проводились. Можно утверждать, что на глубинах более 500 м, куда уходило пятно загрязненных ДО БП также происходит концентрирование ПАУ. В этих глубоководных районах озера деструкция ПАУ значительно уменьшается вследствие низких температур воды и других гидрофизических характеристик.

ВЫВОДЫ

1. Выполненный на оз. Байкал впервые 20 лет назад анализ сточных вод БЦБК, воды и ДО обнаружил в них БП и ПАУ.

2. Установлено, что одним из основных источников поступления БП в воду и ДО являлись сточные воды комбината.

3. Загрязнение воды озера не превышало ПДК для питьевой воды, но в 9–46 раз превышало фоновые значения для пресноводных водоемов.

4. Было обнаружено, что максимальное содержание БП в донных отложениях полигона отмечается в пределах глубин до 100 м в зоне распространения разнозернистых песков. Площадь пятна загрязненных отложений возрастала летом по сравнению с периодом ледостава.

5. Внутригодовая и межгодовая динамика содержания БП на полигоне указывала на хронический характер загрязнения и накопления БП в донных отложениях полигона.

6. В связи с продолжающейся производственной деятельностью БЦБК необходимо возобновление систематического мониторинга как уровня загрязненности ПАУ воды и ДО, так и оценки развития гидробионтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеева Т.А., Теплицкая Т.А.* Спектрофлуорометрические методы анализа ароматических углеводородов в природных и техногенных средах. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 215 с.
2. *Аниканова М.Н.* Соединения серы сточных вод Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (состав, методы, анализы, мониторинг). Научный мир, 2009. 115 с.
3. *Белых Л.И., Пензина Э.Э., Попов Л.Г. и др.* Бенз(а)-пирен в воде и донных отложениях Ангары, Байкала и их притоков // Вод. ресурсы. 1997. Т. 24. № 6. С. 734–739.
4. *Беляев И.И., Ракушина Е.П., Грачева М.П. и др.* О борьбе с загрязнением водоемов ПАУ в зоне размещения производств органического синтеза // Канцерогенные вещества во внутренних и внешних водоемах. М.: Информ. мат. 1982. С. 7–9.
5. *Демченко Е.А., Ливеровский А.А., Шмулевская Э.И. и др.* (название статьи) // Химия древесины. 1988. № 2. С. 96–?
6. *Дикун П.Л., Костенко Л.Д., Ливеровский А.А. и др.* О механизме образования бенз(а)пирена при пиролизе древесины // Растения и химические канцерогены. Л.: Наука. С. 171–173
7. *Дикун П.П., Баранова Л.Н.* Биологическая очистка сточных вод и ее эффективность в отношении канцерогенных веществ // Канцерогенные вещества во внутренних и внешних водоемах. М.: Информ. мат. 1982. С. 10–12.
8. *Кирсо У.Э., Матвеев А.А., Пальме Л.П. и др.* Канцерогенные полициклические углеводороды в экосистеме озера Байкал // Проблемы экологии Прибайкалья: Тез. докл. Третьей Всесоюз. конф. Иркутск. 1988. 76 с.
9. *Косая Г.С.* Производство сульфатной вискозной целлюлозы. М.: Лесная пром-ость, 1966. 179 с.
10. *Князева Л.М.* Осадкообразование в озерах влажной зоны СССР. Южный Байкал // Образование осадков в современных водоемах. М.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 180–236.
11. Методические указания по отбору проб из объектов внешней среды и подготовке их для последующего определения канцерогенных ПАУ. М.: МЗ СССР, 1976. 33 с.
12. *Немировская И.А.* Углеводороды в океане (снег – лед – вода – взвесь – донные осадки). М.: Научный мир, 2004. 328 с.
13. *Резников С.А., Матвеев А.А., Лопатченко Л.Л.* Характеристика загрязненности донных отложений дельты и устьевого взморья Амударьи // Мониторинг природной среды в бассейне Аральского моря. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. С. 116–123.

14. *Резников С.А., Матвеев А.А., Мктрчан Г.М. и др.* Тяжелые металлы в донных отложениях озера Севан // ГХМ. Гидрометеоздат, 1988. С. 100–123.
15. СП 11-102-97. Инженерно-экологические изыскания для строительства.
16. *Тратида М.А.* Распределение канцерогенных ПАУ и мониторинг водной среды (на примере водоемов Прибалтийского региона) Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л. 1985. 20 с.
17. *Шилина А.И., Логинова Н.А., Журавлева А.В. и др.* Загрязнение почвы канцерогенными углеводородами вблизи промышленных комплексов // Канцерогенные вещества в окружающей среде. М.: Гидрометеоздат, 1979. С. 69–71.
18. Экология и рак. Киев: Наук. думка, 1985. 254 с.
19. *Boutwell R.K., Bosch D.K.* The Tumor-promoting action of phenol and related compounds for mouse skin // *Cancer Res.* 1959. V. 19. P. 413–424.
20. *Tolosa I., Mora S., Sheikholeslami M.R. et al.* Aliphatic and aromatic hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments // *Marine Pollution Bulletin.* 2004. V. 1959. №4 8. P. 44–60.

Pollution of the sediments of Lake Baikal by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

A.M. Nikanorov*, S.A. Reznikov*, A.A. Matveev*, V.S. Arakelian,
N. Irkha**, W. Kearse**, L. Palme****

**Hydrochemical Institute, Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring
**National Institute of Chemical Physics and Biophysics*

The paper presents the results of completed in 1981–1988 surveys of benzo (a) pyrene and other polycyclic aromatic hydrocarbons concentrations in the lake Baikal. We studied the distribution of the pollutants in the surface layer of bottom sediments of the lake in the area of sewage of the Baikal Pulp and Paper Mill and in the sewage plant and the lake water. It was found that the content of benzo (a) pyrene in the bottom of the test site in the sewage plant and the lake water is often significantly higher than the requires quality of the environment and the natural background of the lake. Previously, these data could not be published because of existing restrictions.