

УДК 556.5.550.47.579.68

DOI: 10.15372/GIPR20210412

Н.К. ФИШЕР, Л.А. ГАРЕТОВАИнститут водных и экологических проблем ДВО РАН,
680000, Хабаровск, ул. Дикопольцева, 56, Россия, fisher@ivep.as.khb.ru, micro@ivep.as.khb.ru**БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕКИ ТУМНИН
(БАСЕЙН ЯПОНСКОГО МОРЯ)**

Проведены исследования состава, распределения и генезиса органических компонентов в донных отложениях р. Тумнин для комплексной оценки их современного экологического состояния. Исследование гранулометрического состава выявило доминирование пелитовой фракции в осадках большинства обследованных станций (до 98,8 %). Установлено, что пространственная вариабельность условий аккумуляции органических веществ в донных отложениях проявлялась в существенном разбросе минимальных и максимальных концентраций органического углерода — в 65 раз — и массовой доли углеводородов — в 136 раз. По содержанию углеводородов (от 9 до 680 мг/кг) осадки оцениваются в диапазоне «слабо загрязненные» — «очень грязные». По содержанию осадочных пигментов (от 16,1 до 39,8 мг/кг) большая часть осадков относится к эвтрофному типу. Выявлены корреляционные связи между основными источниками органического вещества в исследованных осадках: углеводороды и органический углерод ($r = 0,674$), содержание пигментов и углеводородов ($r = 0,869$), содержание фитопигментов и гетеротрофных бактерий ($r = 0,888$). Сделан вывод, что величина параметра перегрузки самоочищающей способности донных отложений от углеводородов тесно связана с содержанием фитопигментов ($r = 0,873$) и численностью гетеротрофных бактерий ($r = 0,959$), что обусловлено их продукционно-деструкционной деятельностью в отношении углеводородов. Высокие концентрации летучих органических соединений (бутанол, метанол, ацетальдегид, ацетон и др.) свидетельствуют о том, что донные отложения способствуют вторичному загрязнению речной воды. Исследование молекулярного состава углеводородов выявило доминирование в их составе биогенных соединений терригенного генезиса (53,2–76,7 % от суммы), что имеет важное значение при дифференциации антропогенного воздействия в целях экологического мониторинга.

Ключевые слова: органическое вещество, углеводороды, генезис, фитопигменты, бактерии, n-алканы.

N.K. FISHER, L.A. GARETOVAInstitute of Water and Ecological Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
680000, Khabarovsk, ul. Dikopol'tseva, 56, Russia, fisher@ivep.as.khb.ru, micro@ivep.as.khb.ru**BIOGEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE TUMNIN RIVER
(BASIN OF THE SEA OF JAPAN)**

The composition, distribution, and genesis of organic components in bottom sediments of the Tumnin river were studied for a comprehensive assessment of their current environmental status. A study of particle size distribution revealed the dominance of the pelitic fraction in the sediments of most of the sites (up to 98.8 %). It was found that the spatial variability in the accumulation organic substances in bottom sediments led to a significant scatter in the minimum and maximum concentrations of organic carbon, by a factor of 65, and in the mass fraction of hydrocarbons, by a factor of 136. According to hydrocarbon content (from 9 to 680 mg/kg), the sediments are estimated in the range of “slightly polluted” — “very dirty”. According to the content of sedimentary pigments (from 16.1 to 39.8 mg/kg), most of the sediments are of the eutrophic type. Correlations between the main sources of organic matter in the sediments under investigation were revealed: hydrocarbons and organic carbon ($r = 0.674$), the content of pigments and hydrocarbons ($r = 0.869$), and the content of phytopigments and heterotrophic bacteria ($r = 0.888$). It is concluded that the value of overload of the self-purification capacity of the bottom sediments from hydrocarbons is closely associated with the presence of phytopigments ($r = 0.873$) and the number of heterotrophic bacteria ($r = 0.959$), which is due to their production and destruction activity in relation to hydrocarbons. High concentrations of volatile organic compounds (butanol, methanol, acetaldehyde, acetone, etc.) indicate that bottom sediments contribute to secondary pollution of the river water. The study of the molecular composition of hydrocarbons revealed the dominance of biogenic compounds of terrigenous genesis (53.2–76.7 % of the sum), which is important in differentiating anthropogenic impacts for purposes of environmental monitoring.

Keywords: organic matter, hydrocarbons, genesis, phytopigments, bacteria, n-alkanes.

ВВЕДЕНИЕ

Река Тумнин – типичная горная река, которая берет начало на восточном склоне хр. Индя, расположенного на севере Восточного Сихотэ-Алиня, и впадает в бухту Датта Татарского пролива [1]. На всем протяжении нижнего участка р. Тумнин вдоль ее русла проходит железнодорожная магистраль Комсомольск-на-Амуре–Совгавань. При этом водосбор нижнего течения реки мало освоен. В настоящее время наблюдается активизация хозяйственной деятельности в устьях рек на побережье Татарского пролива, происходит сооружение терминалов по перевалке сжиженных углеводородных газов, угля, глинозема.

Согласно Директиве Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2008/105/ЕС по стандартам экологического качества в сфере водной политики [2], необходимо установление экологических стандартов качества для каждого отдельно взятого водного бассейна, объекта. Выявление фоновых значений органических компонентов в условиях изменчивости природных и климатических факторов чрезвычайно важно, как для целей экологического мониторинга, так и для изучения круговорота углерода в глобальных и региональных масштабах.

Речные донные отложения (ДО) находятся в постоянном обмене с водной средой, они представляют собой систему, накапливающую информацию об истории развития водотока и процессах на водосборных территориях. Физические и геохимические свойства ДО во многом определяют величину и интенсивность накопления органических веществ (ОВ) в осадках [3]. В процессах формирования ОВ в ДО участвуют многие группы гидробионтов — водоросли, простейшие, водные насекомые. Особая роль принадлежит микробным сообществам, поскольку они могут одновременно синтезировать ОВ в виде своей биомассы и участвовать в процессах трансформации и деструкции широкого спектра природных и антропогенных органических соединений. При микробиологической деградации ОВ в ДО возможно образование продуктов промежуточного окисления углеводов — спиртов, альдегидов, кетонов, карбоновых кислот, сложных эфиров, а также бифункциональных соединений — альдегидокислот, кетокислот и др. [4].

Следует отметить, что углеводороды (УВ), массовая доля которых при традиционных аналитических исследованиях воды и ДО оценивается как содержание нефтепродуктов, не чужды природным экосистемам, поскольку значительные количества нативных (природных) УВ производятся водной и наземной флорой и фауной. В настоящее время признанный важнейший инструмент изучения генезиса ОВ в водных объектах — исследование молекулярного состава УВ, в частности *n*-алканов. Эти соединения образуются из высокомолекулярных предшественников, встречающихся в живых организмах: каротиноидов, жирных кислот, восков высших растений ОВ [5, 6]. По характерным хроматографическим пикам, групповому составу, содержанию и соотношению молекулярных компонентов можно определить преобладающий тип ОВ [5–9]. Данный подход широко используется для изучения генезиса ОВ в морских и эстуарных экосистемах [10–12]. Исследования происхождения УВ в пресноводных экосистемах немногочисленны [13, 14], а в горных реках до настоящего времени не проводились.

Цель данной работы — изучение состава, распределения и генезиса органических веществ в донных отложениях р. Тумнин.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Бассейн р. Тумнин расположен в пределах гор Восточного Сихотэ-Алиня, имеющих высоту 700–900 м над ур. моря. Длина реки 364 км, площадь водосбора — 22 400 км². Русло реки слабоизвилистое, сильно разветвленное (преобладающая длина рукавов и проток 1–4 км, ширина 40–100 м). Общая залесенность бассейна составляет 83 % [1].

Район исследования находится в верхней трети нижнего течения р. Тумнин (от устья р. Мули до впадения в Татарский пролив). Работы проводили на двух створах: нижний створ расположен на расстоянии 90 км от устья р. Тумнин и характеризуется спрямленным руслом, высокой скоростью течения, имеются небольшие заливы с замедленным течением. Верхний створ в 7 км выше по течению, в районе ст. Акур. От нижнего участка отличается многорукавным извилистым руслом с протоками, отмелями и, вследствие этого, замедленным течением.

Пробы ДО отбирали в период осенней межени 12 и 20 октября 2017 г. на восьми станциях реки (рис. 1). В горных реках осадки преимущественно гравийно-галечные и галечно-песчаные, а основные биогеохимические процессы трансформации ОВ протекают в мелкодисперсных осадках верхнего слоя

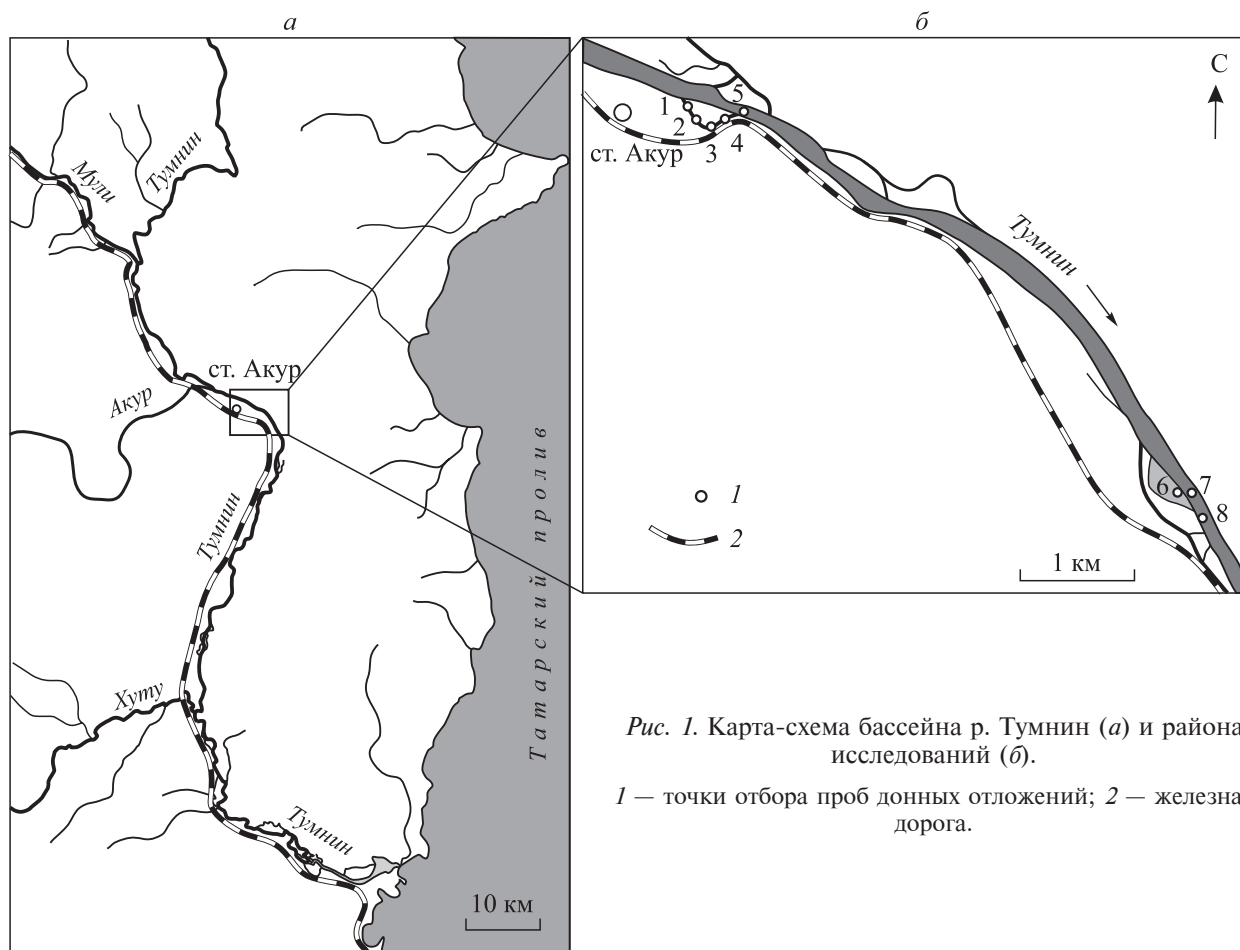


Рис. 1. Карта-схема бассейна р. Тумнин (а) и района исследований (б).

1 — точки отбора проб донных отложений; 2 — железная дорога.

ДО. Поэтому забор проб ДО производился на участках с наличием песчано-илистых отложений: станции 1–4 были заложены на плесах в излучине протоки с системой плесов и перекатов; станции 5, 7 и 8 располагались в нижних плесовых ложбинах основного русла, а ст. 6 — в затонской части нижней плесовой ложины. Для микробиологических и химических анализов пробы отбирали из верхнего (0–10 см) слоя ДО. Химические анализы проводили в Центре коллективного пользования «Межрегиональный центр экологического мониторинга гидроузлов» при Институте водных и экологических проблем ДВО РАН.

Для гранулометрического анализа среднюю пробу ДО, высушенную до воздушно-сухого состояния, измельчали при помощи пестика с резиновым наконечником и просеивали через сито с размером ячеек 2 мм. Размерный состав данной фракции изучали методом лазерной дифракции на приборе Shimadzu SALD-2300 (Япония). Концентрацию $C_{\text{орг}}$ определяли фотометрическим методом после окисления ОВ осадка сульфохромной смесью [15]. Массовую долю УВ определяли по ПНД Ф 16.1:2.2.22–98 [16] на концентратометре КН-2М (Россия). Элюаты четыреххлористого углерода, оставшиеся от количественного анализа УВ, использовали для анализа содержания и состава *n*-алканов, который осуществляли методом капиллярной газовой хроматографии на газовом хроматографе Кристалл 5000.1 (Россия), оснащенный пламенно-ионизационным детектором. Летучие органические соединения (ЛОС) определяли в нативных образцах ДО методом парового анализа в сочетании с газовой хроматографией на хроматографе Кристалл-5000.1 (Россия) по ПНД Ф 14.1:2:4.201-03 [17] и ПНД Ф 14.1:2:4.57-96 [18]. Фотосинтетические пигменты определяли по ГОСТу 17.1.4.02-90 [19] в вариации применительно к определению растительных пигментов в ДО [20]. Концентрацию пигментов определяли на спектрофотометре Shimadzu UVmini-1240 (Япония).

Общую численность гетеротрофных бактерий (ОЧГ) выявляли общепринятыми в микробиологии методами и выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ) в 1 см³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический состав. Гранулометрический состав определяет удельную поверхность ДО, следовательно, влияет на накопление ОВ и процессы его трансформации. В зависимости от типа осадка содержание пелита (Pl), алевроита (Al) и псаммита (Ps) в исследованных осадках варьирует в диапазонах 0–99,9; 0,1–20; 0–80 % соответственно (рис. 2, табл. 1).

Поверхностный слой ДО большинства обследованных станций р. Тумнин в основном представлен илами, за исключением песчаных отложений ст. 7, расположенной на проточном участке нижнего

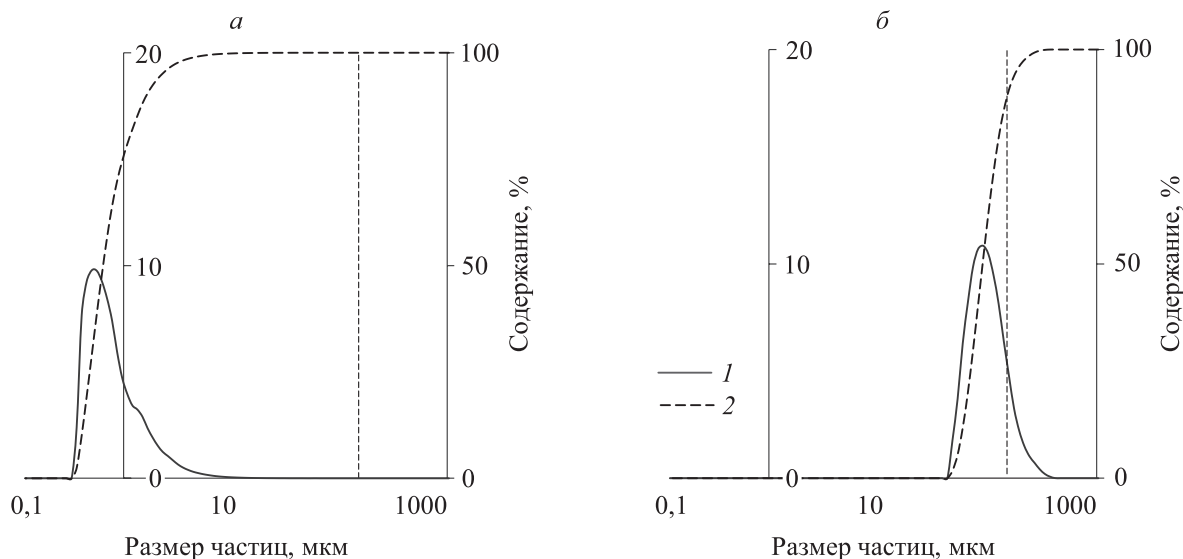


Рис. 2. Распределение частиц в илистых (а, ст. 3) и песчаных (б, ст. 8) осадках р. Тумнин.

Распределение частиц: 1 — по размеру, 2 — кумулятивное.

Таблица 1

Состав донных осадков р. Тумнин

Номер стан-ции	Описание осадков	Состав осадков							
		Pl/Al/Ps*, %	C _{орг} , %	УВ, мг/кг	УВ/C _{орг} , %** (Р)	сумма пигментов, мг/кг	хл а, мг/кг	хл а/C _{орг} , %***	ОЧГ, 1×10 ⁶ КОЕ/см ³
1	Темно-серый ил с галькой 0,5–2,0 см	99,8/0,2/0	3,4	76	0,19	65,8	22,4	6,6	1,33
2	Темно-серый ил с галькой и растительными остатками	93,9/5,3/0,1	0,7	100	1,24	95,5	39,8	56,8	3,22
3	Ил с включением растительных остатков	99,8/0,2/0	6,5	680	0,91	286,4	124,7	19,2	1,74
4	Песчаный ил с включением гальки до 2 см	94,2/5,6/0,1	1,0	122	1,06	65,6	20,9	20,9	0,92
5	Серый песчанистый ил	99,9/0,1/0	0,4	50	1,08	35,8	5,6	14,0	1,39
6	Темно-серый ил с запахом H ₂ S	99,2/0,8/0	1,1	558	4,41	537,7	272,2	24,7	270,00
7	Темно-серый ил с запахом H ₂ S	0/20/80	0,1	9	0,78	27,9	4,0	30	3,06
8	Ил с корнями водных растений	99,5/0,5/0	1,0	46	0,4	54,6	16,2	16,2	0,85

* Pl — пелит, Al — алевроит, Ps — псаммит.

** Для пересчета содержания углерода: в составе УВ использовали коэффициент 0,87 [7].

*** Для пересчета содержания хлорофилла а на углерод в осадках (C_{хл}, мг С/г) применяли формулу: C_{хл} ≈ 100 хл а, где хл а — концентрация хлорофилла в осадках (мг/г) [21].

створа. При более тонкой дифференциации осадков отмечено, что в образцах станций 1, 2, 5 и 6 в доминирующей пелитовой фракции частицы с размером менее 2 мкм составляли 84,9–94,6 %, а в образцах станций 2 и 4 преобладали частицы размером 2–10 мкм (93,9–94,2 %). В пелитах ст. 8 указанные фракции присутствовали в близких количествах — 42,5 и 57,1 %. В псаммитовой фракции осадков ст. 7 доминировали (70,6 %) частицы размером 100–250 мкм. Неравномерность распределения фракций в ДО проявляется в наличии выраженных максимумов на дифференциальных, а также в крутой конфигурации кумулятивных кривых (см. рис. 2). Вероятно, такое распределение частиц типично для рек с высокой скоростью течения.

Содержание $C_{орг}$ и УВ. Содержание $C_{орг}$ в осадках варьировало в широком интервале — от 0,1 до 6,5 %. Максимальное выявлено в илах ст. 3, минимальное — в песках ст. 7 (см. табл. 1). Такая же картина распределения максимальных и минимальных концентраций наблюдалась для УВ, содержание которых в осадках составляло от 9 до 680 мг/кг. Согласно классификации В.И. Уваровой по содержанию УВ [22], качество исследованных ДО оценивается в диапазоне «слабо загрязненные» – «очень грязные».

Один из критериев допустимой углеводородной нагрузки — это соотношение концентраций УВ и $C_{орг}$ в ДО, обозначенное как «параметр перегрузки самоочищающей способности» (P). Условной границей допустимой перегрузки принята величина $УВ/C_{орг} = 0,26$ % [8, 22]. Большинство обследованных станций р. Тумнин характеризуется высокой самоочищающей способностью ДО — $P > 0,55$ %. Достаточно тесная связь между $C_{орг}$ и УВ ($r = 0,674$) (табл. 2) указывает на единый источник их поступления в ДО. Отсутствие корреляции гранулометрических фракций с содержанием $C_{орг}$ и УВ в поверхностном слое осадков р. Тумнин, вероятно, обусловлено мозаичностью их распределения по частицам грунта.

Содержание фитопигментов и гетеротрофных бактерий. Суммарное содержание фитопигментов в исследованных ДО представляет собой результат совместной деятельности фитопланктона, перифитона, фитобентоса, а также высшей водной и наземной растительности, пурпурных и зеленых бактерий. В исследованных осадках оно колебалось в широком диапазоне — от 27,9 до 537,7 мг/кг (см. табл. 1). Важнейшая роль в процессе фотосинтеза среди десятков фотосинтезирующих пигментов отведена хл a , его концентрация может отражать содержание автохтонного ОВ [23]. В исследованных осадках концентрация хл a составляла от 4,0 до 272,2 мг/кг, его доля варьировала от 27,7 до 84 % от общей концентрации хлорофиллов.

Оценка вклада первичной продукции в содержание ОВ в осадках показала (см. табл. 1), что доля $C_{орг}$, входящего в состав хл a , составляет от 6,6 до 30 % от общего $C_{орг}$ осадков. Такой вклад обеспечивается как за счет продукции микрофитобентоса и перифитона, так и за счет аллохтонного ОВ (растительный опад, высшая прибрежная растительность), которое консервируется в зонах илонакопления. Кроме того, известно, что на продукционные характеристики ДО существенно влияет фитопланктон. При этом биомасса водорослей в ДО может составлять 0,4–0,8 % первичной продукции фитопланктона [20].

Корреляция между суммарным содержанием фитопигментов и $C_{орг}$ оказалась слабой ($r = 0,299$) при высокой корреляции суммарного содержания пигментов и УВ ($r = 0,869$) (см. табл. 2), что указывает на биогенный генезис определяемых в осадках УВ.

Согласно градации по содержанию осадочных пигментов [20], участок дна р. Тумнин, занятый песком (ст. 7), относится к олиготрофному типу, осадки ст. 5 — к мезотрофному, илистые осадки станций 1, 2, 4 и 8 — к эвтрофному, а илы станций 3 и 6 — к гипертрофному типу.

Таблица 2

Статистические связи между компонентами донных отложений р. Тумнин

	PI	AI	$C_{орг}$	УВ	Σ пигм	ОЧГ	P
PI	1						
AI	–0,963	1					
$C_{орг}$			1				
УВ	0,324	–0,377	0,674	1			
Σ пигм	0,284	–0,330	0,299	0,869	1		
ОЧГ	0,197	–0,230	–0,131	0,546	0,888	1	
P	0,147	–0,142	–0,182	0,566	0,873	0,959	1

Присутствие ОВ в осадках обуславливает развитие гетеротрофных бактерий. Общая численность гетеротрофных бактерий (ОЧГ) в ДО варьировала в диапазоне от 0,85 до $270 \cdot 10^6$ КОЕ/см³. Максимальные показатели ОЧГ выявлены для сероводородных илов ст. 6. Вероятно, здесь происходит постоянное поступление свежего ОВ. Легкоокисляемые ОВ быстро подвергаются микробиологической деструкции, а трудноминерализуемые вещества накапливаются и консервируются в восстановительных условиях ДО. Четкой зависимости между ОЧГ и содержанием $C_{орг}$ в осадках не выявлено (см. табл. 2). Вместе с тем имеется выраженная зависимость между содержанием первичной продукции и численностью бактерий: для Σпигм и ОЧГ ($r = 0,888$). Между ОЧГ и Р (критерий самоочищающей способности) выявлена тесная связь ($r = 0,959$), что закономерно, поскольку в процессах самоочищения основную роль играют микроорганизмы.

Молекулярный состав УВ. Молекулярный состав УВ изучали в трех различных по гранулометрическому составу образцах ДО. Суммарное содержание *n*-алканов в углеводородной фракции исследованных ДО варьировало от 0,52 до 4,16 мкг/г и изменялось пропорционально общему содержанию УВ. Состав *n*-алканов характеризовался доминированием высокомолекулярных гомологов (табл. 3). Среди них *n*-алканы ΣC_{25} , C_{27} , C_{29} , C_{31} , маркирующие вклад высших растений в происхождение УВ, составляют 53,2–76,7 % от суммы *n*-алканов. Источник ОВ в осадках горных рек преимущественно представляет собой лиственный опад, который активно включается в трофические цепи и в ДО находится на разных стадиях преобразования. Величина индекса нечетности CPI (C_{23} – C_{36}), характеризующая степень преобразованности высокомолекулярного ОВ, возрастала в осадках с высоким содержанием УВ (станции 3 и 6) [9]. Трансформация ОВ в исследованных осадках протекает в окислительных условиях, на что указывает присутствие в достаточно высоком количестве пристана (3,1–5,0 % от суммы *n*-алканов) при отсутствии фитана. Органическое вещество автохтонного, водорослевого генезиса ΣC_{15} , C_{17} , $C_{19} = 19,4$ % от суммы *n*-алканов обнаруживалось только в осадках ст. 1 с высоким содержанием $C_{орг}$ (3,4 %) и умеренным (76 мг/кг) количеством УВ. Участие водорослей в формировании углеводородного фона в ДО подтверждается корреляцией между содержанием пигментов и УВ ($r = 0,869$). Наибольший вклад ОВ бактериального генезиса отмечался в сероводородных илах ст. 6 ΣC_{20} – $C_{24} = 15,9$ % от суммы *n*-алканов. Здесь увеличение доли бактериальных *n*-алканов сопровождалось возрастанием численности гетеротрофных бактерий. В составе *n*-алканов станций 3 и 6 выявлено достаточно высокое — 6,4 и 6,7 % от суммы *n*-алканов соответственно — содержание бактериального гомолога C_{25} , который типичен для цианобактерий, что свидетельствует об определенном вкладе цианобактериального ОВ в происхождение УВ. Обычно сумма *n*-алканов, синтезированных бактериями, не превышает 20 % от общей суммы *n*-алканов [11].

Таким образом, в осадках нижнего течения р. Тумнин выявлены два генетических типа ОВ, тесно связанные со спецификой гидродинамики вод и осадконакопления: первый тип ОВ — терригенно-водорослевые — характерен для осадков протоки верхнего участка реки с умеренным содержанием $C_{орг}$ и УВ (ст. 1); второй тип ОВ — терригенно-бактериальные — свойственен для восстановленных илов застойных участков с высоким содержанием $C_{орг}$ и УВ (станции 3 и 6).

Результаты анализа ЛОС в нативных ДО показывают (табл. 4), что самым широким спектром ЛОС отличаются осадки ст. 3 верхнего участка р. Тумнин, где было зафиксировано максимальное содержание $C_{орг}$ и УВ, а также фитопигментов. Среди продуктов микробиологической анаэробной трансформации в достаточно высоких концентрациях выявлены ацетальдегид, ацетон, бутанол, бутил-ацетат, метанол и др. Содержание бутанола в осадках ст. 3 достигало 25,87 мкг/г, его образование

Таблица 3

Распределение и состав молекулярных маркеров в донных отложениях р. Тумнин

Номер станции	Компоненты		Групповой состав <i>n</i> -алканов, % от общей площади пиков							
	<i>n</i> -алканы, мкг/г	длина углеродной цепи идентифицированных <i>n</i> -алканов	ΣC_{15} – C_{22}	ΣC_{23} – C_{36}	ΣC_{15} – $C_{22} / \Sigma C_{23}$ – C_{36}	CPI (C_{23} – C_{36})	пристан	ΣC_{15} , C_{17} , C_{19}	ΣC_{20} – C_{24}	ΣC_{25} , C_{27} , C_{29} , C_{31}
1	0,52	C_{15} – C_{36}	19,4	75,6	0,26	0,95	5,0	19,4	0,2	53,2
3	4,16	C_{25} – C_{36}	0	100	—	100	3,2	0,2	7,1	76,7
6	2,64	C_{21} – C_{36}	5,1	91,8	0,06	1,33	3,1	0,1	15,9	69,6

Примечание. Прочерк — нет данных.

Таблица 4

 Содержание летучих органических соединений в донных отложениях р. Тумнин, мкг/см³

Соединение	Станция							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ацетальдегид	0,32	0,24	1,47	0,65	—	1,3	1,74	0,04
Ацетон	0,07	0,08	0,39	0,13	0,11	0,44	0,49	0,13
Бутанол	—	—	25,87	—	—	—	—	—
Бутилацетат	—	—	0,35	—	—	—	—	—
Изобутанол	—	—	0,14	—	—	—	—	—
Гексан	0,08	—	0,02	—	0,44	—	—	0,01
Изопропилбензол	—	—	1,09	—	0,01	—	—	—
Метанол	—	—	1,77	1,53	0,72	0,82	2,26	—
<i>m</i> -Ксилол	—	—	Следы	—	—	—	0,13	—
<i>o</i> -Ксилол	0,02	—	0,01	—	—	0,01	—	—
<i>n</i> -Ксилол	—	—	—	—	—	—	0,11	—
Толуол	—	0,05	0,02	—	—	—	—	—
Этилацетат	—	—	0,05	—	—	0,02	—	—

Примечание. Прочерк — компонент не обнаружен.

происходит в результате сбраживания углеводных субстратов многими бактериями рода клостридий (*Clostridium*), в частности клостридия ацетобутиликум (*Cl. acetobutylicum*) и другие виды [4]. Обращает на себя внимание достаточно высокое содержание в осадках отдельных станций ацетальдегида (до 1,74 мкг/см³) и метанола (до 2,26 мкг/см³). Ацетальдегид образуется в анаэробных условиях при брожении веществ углеводной природы. Присутствие в исследованных ДО метанола обусловлено промежуточным окислением метана и его накоплением в анаэробных условиях ДО. Низкомолекулярные ароматические УВ, сопутствующие антропогенному нефтяному загрязнению (бензол и его гомологи), а также вещества двойного генезиса, в частности крезолы, обнаруживались локально и в следовых количествах.

ВЫВОДЫ

Комплексное исследование ДО нижнего течения р. Тумнин показало:

- основной размерной фракцией в исследованных ДО были пелиты (до 98,8 %), за исключением проточного участка (ст. 7), где в доминирующей псаммитовой фракции частицы размером 100–250 мкм составляли 70,6 %;
- неравномерность распределения ОВ в илистых осадках обусловлена процессами переноса, перемива и переотложения, характерными для горных рек, где именно мелкодисперсные фракции представляют собой основную транспортную форму ОВ от источников их образования до локальных участков захоронения;
- по содержанию УВ исследованные илистые осадки имеют характеристику не менее «умеренно загрязненных», а песчаные — «слабо загрязненных»;
- по содержанию осадочных пигментов большинство исследованных осадков относится к эвтрофному типу;
- величина перегрузки самоочищающей способности ДО от УВ коррелирует с численностью гетеротрофных бактерий ($r = 0,959$), осуществляющих процессы самоочищения, и содержанием фитопигментов, отражающих продукционные процессы в осадках;
- в составе ЛОС преобладают продукты микробиологической трансформации ОВ, их высокие концентрации свидетельствуют о том, что ДО способствуют вторичному загрязнению речной воды;
- по данным молекулярного анализа, наибольший вклад в состав УВ исследованных осадков вносят высокомолекулярные соединения терригенного генезиса, которые играют роль в формировании уровней фоновых концентраций, превышающих нормативные значения для незагрязненных осадков, что важно учитывать при дифференциации антропогенного загрязнения в целях экологического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ресурсы** поверхностных вод СССР. Т. 18: Дальний Восток, вып. 3: Приморье. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 627 с.
2. **Директива** Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2008/105/ЕС от 16 декабря 2008 г. о стандартах качества в области водной политики, изменении и последующей отмене Директив Совета 82/176/ЕЭС, 83/513/ЕЭС, 84/156/ЕЭС, 84/491/ЕЭС, 86/280/ЕЭС и об изменении Директивы 2000/60/ЕС [Электронный ресурс]. — <https://base.garant.ru/2569252/> (дата обращения 21.04.2019).
3. **Никаноров А.М., Страдомская А.Г.** Химический состав органических и минеральных веществ иловых донных отложений незагрязненных водных объектов // Водные ресурсы. — 2006. — Т. 33, № 1. — С. 71–77.
4. **Heider J., Spormann A.M., Beller H.R.** Anaerobic bacterial metabolism of hydrocarbons // FEMS Microbiology Reviews. — 1999. — Vol. 22. — P. 459–473.
5. **Петров А.А.** Химия алканов. — М.: Наука, 1974. — 243 с.
6. **Hockun K., Mollenhauer G., Ho S.L., Hefter J., Ohlendorf C., Zolitschka B., Mayr C., Lücke A., Schefuß E.** Using distributions and stable isotopes of n-alkanes to disentangle organic matter contributions to sediments of Laguna Potrok Aike, Argentina // Organic Geochemistry. — 2016. — Vol. 102. — P. 110–119.
7. **Знаменщиков А.Н.** Определение структурно-группового состава и общего содержания углеводородов в нефтях и нефтяных загрязнениях спектральными методами: Автореф. дис. ... канд. хим. наук — Тюмень: Изд-во Тюмен. ун-та, 2012. — 19 с.
8. **Кремлёва Т.А.** Геохимические факторы устойчивости водных систем к антропогенным нагрузкам: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. — Тюмень: Изд-во Ин-та геохимии и аналитической химии РАН, 2015. — 50 с.
9. **Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M.** The Biomarker Guide: Vol. 2: Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History. — Cambridge: Cambridge University Press, 2007. — 704 p.
10. **Немировская И.А.** Углеводороды в океане (снег–лед–вода–взвесь–донные осадки). — М.: Научный мир, 2004. — 318 с.
11. **Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В., Пересыпкин В.И., Чаркин А.Н.** Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геохимия. — 2008. — № 2. — С. 183–195.
12. **Гаретова Л.А., Фишер Н.К.** Состав и генезис органического вещества в донных отложениях зоны смешения вод (юго-западный район Татарского пролива) // Экологическая химия. — 2017. — Т. 26, № 3. — С. 124–131.
13. **Немировская И.А., Боев А.Г., Титова А.М., Торгунова Н.И.** Исследование Волги в рейсе научно-исследовательского судна «Академик Топчиев» // Водные ресурсы. — 2017. — Т. 44, № 2. — С. 342–345.
14. **Немировская И.А., Островская Е.В.** Мониторинг органических соединений в водосборе Волги // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — 2018. — Т. 39, № 4. — С. 65–85.
15. **Бельчикова Н.П.** Определение гумуса почвы по методу И.В. Тюрина // Агрохимические методы исследования почв. — М.: Наука, 1975. — С. 56–62.
16. **ПНД Ф 16.1:2.2.22–98.** Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. — М.: Гос. ком. РФ по охране окружающей среды, 2005. — 21 с.
17. **ПНД Ф 14.1:2.4.201–03.** Методика выполнения измерений массовой концентрации ацетона и метанола в пробах питьевых, природных и сточных вод газохроматографическим методом. — М.: Гос. ком. РФ по охране окружающей среды, 2003. — 17 с.
18. **ПНД Ф 14.1:2.4.57–96.** Методика выполнения измерений массовых концентраций ароматических углеводородов в питьевых, природных и сточных водах газохроматографическим методом. — М.: Гос. ком. РФ по охране окружающей среды, 2011. — 18 с.
19. **ГОСТ 17.1.4.02–90.** Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. ИПК. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 15 с.
20. **Сигарёва Л.Е.** Хлорофилл в донных отложениях Волжских водоемов. — М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. — 217 с.
21. **Уварова В.И.** Современное состояние качества воды р. Оби в пределах Тюменской области // Вестн. экологии, лесоведения и ландшафтоведения. — 2000. — Вып. 1. — С. 18–26.
22. **Марьяш А.А., Ходоренко Н.Д., Звалинский В.И., Тищенко П.Я.** Органический углерод в эстуарии реки Раздольная (Амурский залив, Японское море) в период ледостава // Геохимия. — 2015. — № 8. — С. 734–742.
23. **Бульон В.В.** Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. — СПб.: Наука, 1994. — 222 с.

Поступила в редакцию 03.06.2019

После доработки 13.01.2021

Принята к публикации 24.06.2021