

УДК 556.574(571.62)

СОСТАВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ Р. ТУМНИН

Н.К. Фишер, Л.А. Гаретова, С.И. Левшина
Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,
ул. Дикопольцева 56, г. Хабаровск, 680000,
e-mail: micro@ivep.as.khb.ru, fisher@ivep.as.khb.ru

В донных осадках (ДО) нижнего течения р. Тумнин исследовали распределение органического углерода ($C_{орг}$), углеводов (УВ) и биотических компонентов (фитопигменты, гетеротрофные бактерии). Концентрационная вариабельность $C_{орг}$ в ДО составляет 65, а УВ – 136 раз. Основной размерной фракцией исследованных осадков являлись пелиты (до 98,8%). По содержанию осадочных пигментов большинство исследованных осадков относятся к эвтрофному типу. По принятым в настоящее время градациям содержания УВ исследованные илистые осадки оцениваются в диапазоне «слабо загрязненные» – «очень грязные». В отсутствие выраженного антропогенного пресса УВ в осадках имеют биогенный генезис, но способны формировать высокие уровни фоновых концентраций (до 680 мг/кг).

Ключевые слова: донные отложения, органические вещества, углеводороды, фитопигменты, гетеротрофные бактерии.

Введение

Река Тумнин – типичная горная река, берет начало на восточном склоне хребта Индя, расположенного на севере Восточного Сихотэ-Алиня; впадает в бухту Датта Татарского пролива. Длина реки 364 км, площадь водосбора 22 400 км². Бассейн реки расположен в пределах гор восточного Сихотэ-Алиня, имеющих высоту 700–900 м [10]. По условиям протекания р. Тумнин можно разделить на три участка: исток – устье р. Чичимар, устье р. Чичимар – устье р. Мули, устье р. Мули – устье. Юго-восточная часть бассейна представляет собой плоское или слабовсхолмленное базальтовое плато, постепенно снижающееся к побережью Татарского пролива. Общая залесенность бассейна составляет 83%. Болота занимают около 2% водосбора [10]. Вдоль нижнего участка русла р. Тумнин проходит железнодорожная магистраль Комсомольск-на-Амуре – Совгавань.

В настоящее время водосбор нижнего течения р. Тумнин является малоосвоенным, поэтому выявление фоновых значений компонентов водной экосистемы в условиях изменчивости природных и климатических факторов чрезвычайно важно для целей экологического мониторинга. Согласно рамочной директиве 2008/105/ЕС необходимо установление экологических стандартов качества для каждого отдельно взятого водного

объекта. Такие исследования важны для сохранения оптимальных условий обитания ценных видов ихтиофауны р. Тумнин – различных видов лососевых (кета, горбуша, сима и др.), а также сахалинского осетра.

Исследования водотоков восточного Сихотэ-Алиня в основном касаются химического состава речных вод [3, 14, 16]. Речные воды бассейна р. Тумнин характеризуются низким содержанием основных ионов и соответственно низкой минерализацией (<65 мг/дм³). По химическому составу воды относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция, первому типу. Содержание органических веществ (ОВ) в воде существенно варьирует (перманганатная окисляемость от 2,7 до 20,3 мгО/дм³) вследствие разнообразия ландшафтной структуры водосборов, включающих заболоченные поймы и хозяйственно освоенные равнинные участки.

Исследованию речных ДО не уделяется должного внимания, несмотря на то, что именно они отражают (суммируют) многолетнее воздействие разнообразных природных и антропогенных факторов, источников загрязнения, часть которых в момент наблюдения может уже не функционировать. ДО формируются под воздействием сложной совокупности природных процессов: климатических, гидрологических, физических, химических

и биологических, протекающих как в самом водном объекте, так и на его водосборной площади [12]. Они представляют собой сложную многокомпонентную систему, имеющую чрезвычайно важное значение для функционирования экосистемы в целом. В водных экосистемах они играют роль биогеохимического барьера, через который происходит обмен вещества и энергии [1]. Являясь хранилищем значительных запасов различных соединений, ДО могут при определенных условиях поставлять их обратно в толщу воды [19].

Гранулометрический состав ДО является одним из основных параметров, характеризующих типы осадков, а также дающих возможность судить о механизме процесса седиментации и динамике водной среды. Он оказывает влияние на аккумуляцию ОБ, физико-механические, окислительно-восстановительные условия, поглощательную способность, структурное состояние осадков [15, 17].

В процессах формирования ОБ в ДО уча-

ствуют многие группы водных гидробионтов – водоросли, простейшие, водные насекомые. Для рек горно-таежной зоны важным источником ОБ являются эпилитонные водоросли, а также листовая опад, который активно используется в трофических сетях [5, 6]. Особая роль принадлежит микробным сообществам, поскольку микроорганизмы могут одновременно синтезировать ОБ в виде своей биомассы и участвовать в процессах трансформации и деструкции широкого спектра природных и антропогенных органических соединений.

Целью работы является оценка вещественного состава и биотических компонентов в донных осадках р. Тумнин.

Объекты и методы

Исследования проводили в октябре 2017 г. на двух створах нижнего течения р. Тумнин (рис. 1): нижний створ находится на расстоянии 90 км от устья и характеризуется спрямленным руслом, здесь имеются небольшие заливы с ослаб-

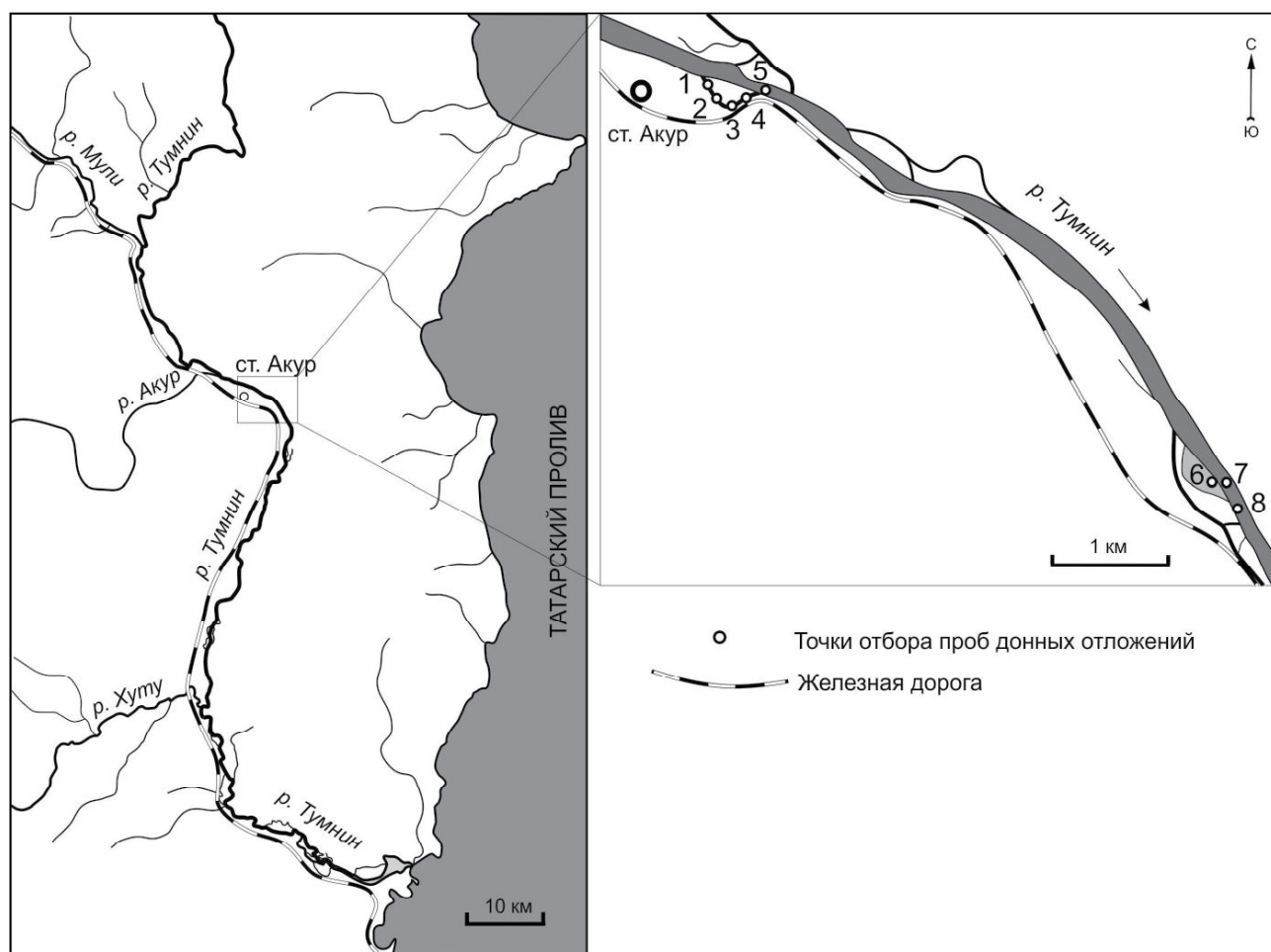


Рис. 1. Карта-схема района исследований

Fig. 1. Scheme of the research area

ленным течением. Верхний створ расположен в 7 км выше по течению, в районе станции Акур. От нижнего участка он отличается извилистым руслом с многочисленными протоками, отмелями и, вследствие этого, замедленным течением. Отбор проб ДО осуществляли в период осенней межени 12 и 20 октября 2017 г. на 8 станциях, расположенных на основном русле р. Тумнин и ее протоках. Схема расположения пунктов отбора проб представлена на рис. 1. Отбор проб производили пробоотборником Burkle, для микробиологических и химических анализов использовали слой 0–5 см. Химические анализы проб осуществляли в ЦКП «Межрегиональный центр экологического мониторинга гидроузлов» при ИВЭП ДВО РАН.

Для гранулометрического анализа образцы грунта, высушенные до воздушно-сухого состояния, растирали в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником и пропускали через сито с ячейей 2 мм. Размерный состав данной фракции осадков изучали методом лазерной дифракции на приборе Shimadzu SALD-2300 (Wing SSALD II: Version 3.0.7. (Япония)).

Концентрацию $C_{орг}$ в образцах ДО определяли фотометрическим методом после окисления ОБ осадка сульфохромной смесью [2]. Определение массовой доли УВ в ДО выполняли по ПНД Ф 16.1:2.2.22–98. Измерения проводили на концентратометре КН-2М (Сибэкоприбор, Россия).

Фотосинтетические пигменты в ДО определяли согласно стандарту (ГОСТ 17.1.4.02-90) в вариации применительно к определению растительных пигментов в ДО [11]. Концентрацию пигментов определяли спектрофотометрическим методом на спектрофотометре Shimadzu UVmini-1240.

Микробиологические посеы ДО производили в полевой лаборатории не позднее 1 ч после отбора проб согласно общепринятым в водной микробиологии методам [8]. Определяли общую численность гетеротрофных бактерий (ОЧБ), численность евтрофной группы сапрофитных бактерий (СБ) и нефтеокисляющих бактерий (НОБ). Результаты подсчета выражали в численности колониеобразующих единиц (КОЕ) микроорганизмов в 1 см³ грунта.

Результаты и обсуждение

Поверхностный слой ДО р. Тумнин в основном представлен илами, за исключением осадков середины реки на нижнем створе (ст. 7), где 80% составляла песчаная фракция (табл. 1). В целом гранулометрический состав ДО характеризуется хорошей отсортированностью, что типично

для рек с высокой скоростью течения. Несмотря на близкий гранулометрический состав, илистые образцы ДО отличались по содержанию ОБ, что, вероятнее всего, обусловлено присутствием в них остатков водной растительности, находящихся на разных стадиях разложения. Максимальное содержание $C_{орг}$ выявлено в осадках ст. 3, отобранных в излучине протоки на верхнем участке, и было в 16 раз выше, чем в основном русле реки (ст. 5). Минимальное содержание $C_{орг}$ было в песчаных осадках ст. 7 нижнего участка. Вероятной причиной слабой деградации и вследствие этого накопления ОБ в осадках извилистого русла является преобладание процессов его образования и/или привноса над процессами его трансформации и переноса. Другой причиной повышенного содержания $C_{орг}$ в осадках отдельных станций (ст. 1, 3) является преобладание анаэробной деструкции ОБ, которая не обеспечивает полного разложения трудноокисляемых веществ.

В исследованных ДО содержание УВ варьировало от 9 до 680 мг/кг при максимальном содержании в илах излучины протоки верхнего участка (ст. 3) и минимальном в песках ст. 7. Согласно классификации В.И. Уваровой [13], по содержанию УВ (мг/кг сухого грунта) ДО могут быть разделены на: чистые – 0–5,5; слабо загрязненные – 5,5–25,5; умеренно загрязненные – 25,6–55,5; загрязненные – 55,6–205,5; грязные – 205,6–500, очень грязные – >500. По данной градации качество исследованных ДО по содержанию УВ оценивается в диапазоне «слабо загрязненные» – «очень грязные».

Другим критерием допустимой углеводородной нагрузки является соотношение концентраций УВ и $C_{орг}$ в ДО, обозначенного как «параметр перегрузки очищающей способности» (Р). Условной границей допустимой перегрузки принята величина $УВ/C_{орг} = 0,26\%$, средней перегрузки – величина $< P \leq 0,55\%$, высокой – $P > 0,55$ [7]. В исследованных осадках соотношение $УВ/C_{орг}$ изменялось от 0,22 до 5,0%. В отсутствии явных источников антропогенного воздействия на ст. 6 величина Р (5,0%), вероятнее всего, обусловлена накоплением и консервацией УВ природного генезиса в анаэробных условиях сероводородных илов. Содержание ОБ в донных осадках тесно связано с их гранулометрическим составом [17]. Однако в нашем случае корреляционный анализ не выявил никаких заметных связей в распределении $C_{орг}$ и УВ по фракциям осадков. Корреляция гранулометрических фракций с содержанием $C_{орг}$ и УВ для пелитов была слабой ($r = 0,34$ и

Composition of the Tumnin River bottom sediments

Станция	Описание ДО	Доминирующая фракция, Pl/Al/Ps,%	$C_{орг}^2$, %	УВ, мг/кг	УВ/ $C_{орг}^2$, %
1	Темно-серый ил с галькой 0,5–2,0 см	99,8/0,2/0	3,4	76	0,22
2	Темно-серый ил с галькой и растительными остатками	93,9/5,3/0,1	0,7	100	1,42
3	Ил с включением растительных остатков	99,8/0,2/0	6,5	680	1,4
4	Песчаный ил с включением гальки до 2 см	94,2/5,6/0,1	1,0	122	1,22
5	Серый ил	99,9/0,1/0	0,4	50	1,25
6	Темно-серый ил с запахом H_2S	99,2/0,8/0	1,1	558	5,0
7	Серый песок с включениями гравия <1 см	0/20/80	0,1	9	0,9
8	Ил с корнями водных растений	99,5/0,5/0	1,0	46	4,6

0,30 соответственно), для алевритов отсутствовала. Вероятно, ОВ в поверхностном слое осадков р. Тумнин мозаично распределяется по частицам грунта. Одновременно выявлено существование связи между $C_{орг}$ и УВ ($r = 0,68$), что указывает на единый источник их поступления в ДО.

Одним из источников формирования пелитовых фракций ДО является развитие фитопланктона [15]. В ДО фотосинтетические пигменты служат маркерами ОВ, синтезированного фитопланктоном, фитобентосом, высшей водной растительностью, пурпурными и зелеными бактериями [20]. Осаждение и захоронение пигментов в осадках определяется совокупным действием биологических, физических и химических факторов в водоеме и на водосборе.

Концентрации фотосинтетических пигментов в исследованных ДО колебались в достаточно больших диапазонах: хлорофилл (хл) $a - 3,97-272,20$ мкг/г (в среднем 63,21 мкг/г), хл $b - 7,43-23,62$ мкг/г (в среднем 12,03 мкг/г), хл $c1+c2 - 1,85-35,63$ мкг/г (в среднем 9,67 мкг/г), каротиноиды (кар.) – 13,59–214,09 мкг/г (в среднем 61,24 мкг/г) (табл. 2). Важнейшая роль в процессе фотосинтеза среди десятков фотосинтезирующих пигментов отведена хл a , его концентрация может отражать содержание автохтонного ОВ. В исследованных осадках его доля варьировала от

27,7 до 84% от общей концентрации хлорофиллов. Высокое содержание хл a и его доли от суммы хлорофиллов в илистых осадках ст. 3 и 6 указывает на поступление свежесинтезированного ОВ. Известно, что хл a в первую очередь подвергается микробиологической и физико-химической деградации. Эти явления сопровождаются накоплением более устойчивых каротиноидов [4]. Поэтому пигментное отношение (ПО), равное отношению суммы концентраций общих каротиноидов к концентрации хл a , является показателем уровня функциональной активности фитоценоза. Повышение этого соотношения свидетельствует об угнетенном состоянии водорослей [9] либо о старении сообщества [6]. Для водорослевых сообществ в оптимальных условиях ПО обычно не превышает 2–5 [4]. В исследованных осадках ПО варьировало от 0,89 до 3,33, что свидетельствует о нормальном функционировании водорослевых сообществ.

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

Корреляция между суммарным содержанием фитопигментов и $C_{орг}$ оказалась слабой ($r = 0,3$),

№	Содержание пигментов, мкг/г					ПО	% хл <i>a</i> от Σхлорофиллов
	хл <i>a</i>	хл <i>b</i>	хл <i>c</i>	кар.	Σпигм		
1	22,38	9,97	4,98	28,48	65,81	1,40	59,9
2	39,81	9,80	6,11	39,73	95,45	1,12	71,5
3	124,66	23,62	14,93	123,19	286,41	1,11	76,4
4	20,93	10,78	5,25	28,69	65,64	1,50	56,6
5	5,60	7,43	4,98	17,76	35,78	3,25	30,9
6	272,20	15,76	35,63	214,09	537,69	1,64	84,11
7	3,97	8,49	1,85	13,59	27,90	3,33	27,7
8	16,16	10,41	3,59	24,39	54,55	0,89	53,6

а корреляция суммарного содержания пигментов и УВ ($r = 0,87$) – высокой, что может указывать на то, что в составе определяемых в осадках УВ, вероятнее всего, присутствуют синтезированные растительностью (водной и наземной) углеводороды.

Присутствие ОВ в осадках обуславливает развитие бактерий различных эколого-трофических групп. Общая численность гетеротрофных бактерий (ОЧГ) в ДО варьировала в широком диапазоне – от 0,8 до 270×10^6 КОЕ/см³. Максимальные показатели ОЧГ выявлены в сероводородных илах ст. 6. Вероятно, здесь происходит постоянное поступление свежего ОВ. Легкоокисляемое ОВ быстро подвергается микробиологической деструкции, а трудноминерализуемые вещества накапливаются и консервируются в восстановительных условиях ДО. Численность сапрофитных бактерий (СБ) составляла $0,76-83,3 \times 10^5$ КОЕ/см³, при этом величина индекса трофности (ИТ = ОЧГ/СБ) варьировала в пределах от 4,2 до 32,4. Четкой зависимости между численностью микроорганизмов (ОЧБ, СБ, НОБ) и содержанием $S_{\text{орг}}$ в осадках не выявлено. Вместе с тем имеется выраженная зависимость между содержанием первичной продукции и численностью бактерий: для Σпигм и ОЧГ, а также для Σпигм и СБ ($r = 0,888$ и $0,886$ соответственно). Связь между содержанием УВ и НОБ, а также между Σпигм и НОБ была выражена гораздо слабее ($r = 0,42$ и $0,51$ соответственно), что обусловлено разнообразием источников поступления ОВ в осадки и

различной степенью их преобразованности. Наиболее отчетливая связь между содержанием фитопигментов, УВ и численностью бактерий проявлялась для станций нижнего створа, существенно отличавшихся между собой по вещественному и гранулометрическому составу (рис. 2).

Выводы

Исследование органических веществ в ДО

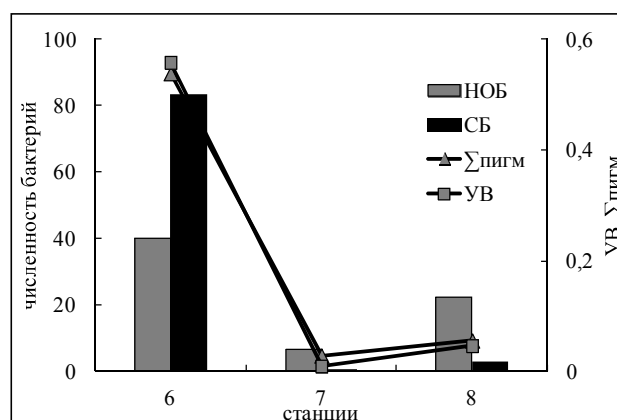


Рис. 2. Содержание фитопигментов (Σпигм, мг/кг), углеводородов (УВ, мг/кг), сапрофитных (СБ, 1×10^5 КОЕ/см³) и нефтеокисляющих бактерий (НОБ, 1×10^5 КОЕ/см³)

Fig. 2. Content of phytopigments (Σpigm, mg/kg), hydrocarbons (HC, mg/kg), saprophytic (SB, 1×10^5 CFU/cm³) and hydrocarbon-oxidizing bacteria (HOB, 1×10^5 CFU/cm³)

русла и проток р. Тумнин в ее нижнем течении выявило существенные различия по содержанию $C_{орг}$ и УВ. Разброс минимальных и максимальных концентраций $C_{орг}$ составляет 65, УВ – 136 раз, что свидетельствует о пространственной вариабельности участков аккумуляции ОВ. Основной размерной фракцией в исследованных осадках являлись пелиты (до 98,8%). Неравномерность распределения ОВ в илистых осадках обусловлена процессами переноса, перемыва и переотложения, характерными для горных рек, в которых именно мелкодисперсные фракции являются основной транспортной формой ОВ от источников их образования до локальных участков их захоронения. По содержанию осадочных пигментов большинство исследованных отложений относится к эвтрофному типу. По принятым в настоящее время градациям содержания УВ исследованные илистые осадки оцениваются в диапазоне «слабо загрязненные» – «очень грязные». В отсутствие выраженного антропогенного пресса УВ в осадках имеют биогенный генезис и в зависимости от условий способны формировать высокие уровни фоновых концентраций, что важно при дифференциации антропогенного воздействия в целях экологического мониторинга.

Авторы выражают благодарность инженеру ЦКП «Межрегиональный центр экологического мониторинга гидроузлов» при ИВЭП ДВО РАН Е.В. Харитонову и ведущему научному сотруднику ИВЭП ДВО РАН М.А. Климину за помощь в выполнении анализов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Белкина Н.А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 35–41.
2. Бельчикова Н.П. Определение гумуса почвы по методу И.В. Тюрина // Агрехимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. С. 56–62.
3. Болдескул А.Г., Шамов В.В., Гарцман Б.И., Кожевникова Н.К. Ионный состав генетических типов вод малого речного бассейна: стационарные исследования в центральном Сихотэ-Алине // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33, № 2. С. 90–101.
4. Бульон В.В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. СПб.: Наука, 1994. 222 с.

5. Гаретова Л.А., Левшина С.И. Бактериопланктон речных экосистем горно-таежной зоны // Биология внутренних вод. 2007. № 4. С. 25–33.
6. Елизарова В.А. Состав и содержание растительных пигментов в водах Рыбинского водохранилища // Гидробиологический журнал. 1973. Т. 9, № 2. С. 23–33.
7. Кремлева Т.А. Геохимические факторы устойчивости водных систем к антропогенным нагрузкам: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2015. 50 с.
8. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 228 с.
9. Курейшевич А.В., Сиренко Л.А., Медведь В.А. Многолетняя динамика содержания хлорофилла *a* и особенности развития фитопланктона в Днепродзержинском водохранилище // Гидробиологический журнал. 1999. Т. 35, № 2. С. 49–62.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 3. Приморье / под ред. М.Г. Васьяковского. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 628 с.
11. Сигарева Л.Е. Хлорофилл в донных отложениях Волжских водоемов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 217 с.
12. Субетто Д.А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. 339 с.
13. Уварова В.И. Современное состояние качества воды р. Обь в пределах Тюменской области // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. Вып. 1. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2000. С. 18–26.
14. Форина Ю.А., Шестеркин В.П. Особенности химического состава речных вод восточного макросклона северного Сихотэ-Алиня // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 81–87.
15. Шерышева Н.Г., Ракитина Т.А., Поветкина Л.П. Условия формирования гранулометрического состава иловых отложений на территории национального парка «Самарская Лука» // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. Самарская Лука. 2009. Т. 18, № 3. С. 104–113.
16. Шестеркин В.П. Гидрохимия рек природного заказника «Тумнинский» // Водное хозяйство России. 2018. № 3. С. 4–15.

17. Hagemann L., Buchty-Lemke M., Lehmkuhl F., Alzer J., Kümmerle A.E., Schwarzbauer J. Exhaustive screening of long-term pollutants in riverbank sediments of the Wurm River, Germany // *Water, air, soil pollution*. 2018. Vol. 229. P. 197.
18. Peters K., Moldowan J. *The biomarker guide. Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments*. New Jersey. 1994. 364 p.
19. Walling D.E., Owens P.N., Carter J., Leeks G.J.L., Lewis S., Meharg A.A., Wright J. Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems // *Applied geochemistry*. 2003. Vol. 18. P. 195–220.
20. Yang S., Cui Z., Zhang Y., Jiang T., Yang Q., Sun Y. Photosynthetic pigments in surface sediments in the northwest of the Bohai Sea, China: potential implications for sediment deposition of brown tides of *Aureococcus anophagefferens* in coastal waters // *Ecological indicators*. 2019. Vol. 102. P. 145–153.

COMPOSITION AND DISTRIBUTION OF ORGANIC MATTER IN BOTTOM SEDIMENTS DOWNSTREAM OF THE TUMNIN RIVER

N.K. Fisher, L.A. Garetova, S.I. Levshina

The distribution of total organic carbon (TOC), hydrocarbons and biotic components (phytopigments, heterotrophic bacteria) was studied in bottom sediments of the Tumnin River downstream. Concentration variability of TOC in bottom sediments is 65, and hydrocarbons – 136 times. The main size fraction of the studied sediments was pelites (up to 988%). According to the content of sedimentary pigments, most of the studied sediments are eutrophic type. According to the currently accepted gradations of hydrocarbon content, the authors estimated the studied silt sediments in the range of "slightly polluted" – "highly polluted". In the absence of a pronounced anthropogenic pressure, hydrocarbons in the sediments have a biogenic genesis, but they can form high levels of background concentrations (up to 680 mg/kg).

Keywords: *bottom sediments, organic matter, hydrocarbons, phytopigments, heterotrophic bacteria.*