

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 556.531.5 (571.1)

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(87-95)

Н. И. ТАНАНАЕВ*, **, ***, Л. С. ЛЕБЕДЕВА*, ****

*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, nikita.tananaev@gmail.com, lyudmilaslebedeva@gmail.com

**Югорский НИИ информационных технологий,
628010, Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151, Россия, nikita.tananaev@gmail.com

***Университет Тулузы, Франция,
Avenue de l'Agrobiopole BP 32607 31326, Castanet-Tolosan, Cedex, France, nikita.tananaev@gmail.com

****Государственный гидрологический институт Росгидромета, 199053, Санкт-Петербург,
2-я линия Васильевского острова, 23, Россия, lyudmilaslebedeva@gmail.com

ОРГАНИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА МАЛЫХ ВОДОТОКОВ ЕНИСЕЙСКОГО СЕВЕРА В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД

Проведена количественная оценка стока взвешенных наносов и органической составляющей взвеси в водах малых водотоков тундрово-таежной зоны Енисейского Севера (район г. Игарки Красноярского края) в период летне-осенней межени 2014 г. Выявлено, что на исследованных объектах общая мутность воды изменялась от 2 до 18 мг/л. Доля органического вещества во взвеси составляет 16,4–74,1 % и зависит от ландшафтно-геоморфологических условий формирования стока взвешенных наносов: она выше у водотоков с тундровыми водосборами и ниже на залесенных водосборах, подстилаемых супесями и суглинками. Содержание взвешенного органического вещества изменяется от водосбора к водосбору от 1,63 до 2,42 мг/л, средняя концентрация взвешенного органического углерода оценивается в пределах 0,73–1,09 мг С/л. Показано, что основным источником поступления органического и минерального взвешенного вещества в воду двух из трех изучаемых водотоков служат локальные русловые деформации, а в воду третьего водотока оно поставляется поверхностным либо быстрым подповерхностным стоком в органическом горизонте почвы во время прохождения паводков. Получены региональные эмпирические зависимости, связывающие расход воды, общую мутность и долю взвешенного органического вещества. В многолетнем разрезе доля органического вещества в годовом стоке взвешенных наносов р. Гравийки составляет 25 %, доля органического углерода — 11 %, или в абсолютных величинах 406 и 183 т в год, и в единицах слоя 1,26 и 0,57 т/км² соответственно.

Ключевые слова: взвешенные наносы, взвешенное органическое вещество, взвешенный углерод, тундрово-таежная зона, Енисейский Север.

N. I. TANANAEV*, **, ***, L. S. LEBEDEVA*, ****

*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Merzlotnaya, 36, Yakutsk, 677010, Russia, nikita.tananaev@gmail.com, lyudmlalebedeva@gmail.com

**Yugra Research Institute of Information Technologies, ul. Mira, 151, Khanty-Mansiisk, 628010, Russia

***L'Université de Toulouse, Avenue de l'Agrobiopole BP 32607,
Castanet-Tolosan, Cedex, 31326, France, nikita.tananaev@gmail.com

****State Hydrological Institute of Roshydromet, Vtoraya Liniya Vasil'evskogo Ostrova,
23, St. Petersburg, 199053, Russia, lyudmilaslebedeva@gmail.com

THE ORGANIC COMPONENT OF PARTICULATE MATTER IN SMALL STREAMS OF THE NORTHERN YENISEI REGION DURING THE SUMMER-AUTUMN PERIOD

A quantitative assessment is made of suspended sediment load, including particulate organic matter and organic carbon, in 2014 for the small streams of the Northern Yenisei region, in the taiga-tundra transition zone (near the city of Igarka, Kras-

noyarsk krai). It was found that the suspended sediment concentration (SSC) of the streams under investigation fluctuated between 2 and 18 mg/L during the summer–autumn low-water period of 2014. The proportion of particulate organic matter (POM) in the total sediment yield varied from 16.4 to 74.1 %, depending on landscape–geomorphological conditions for suspended sediment formation: it is higher for streams with tundra catchments and lower on forest watersheds underlain by sandy and clayey loams. The POM content varies from catchment to catchment from 1.63 to 2.42 mg/L, and the mean concentration of particulate organic carbon (POC) is estimated at 0.73 to 1.09 mg C/L. It is shown that the local channel transformations serve as the main source of POM and POC input to the water of two out of three streams under study. Surface runoff or fast subsurface flow in the organic soil horizon is the external source of POM input to the water of the third stream during flooding. Regional empirical dependencies were obtained, which correlate the water discharge, total SSC and the proportion of POM are obtained. The long-term proportion of POM in the annual suspended sediment flow of the Graviyka river makes up 25 % and POC, 11 %, or, in absolute values, 406 and 183 t/year, and in units of layer 1.26 and 0.57 t/km², respectively.

Keywords: *suspended sediment, particulate organic matter, particulate organic carbon, tundra–taiga transition zone, Northern Yenisei region.*

ВВЕДЕНИЕ

В глобальном масштабе реки служат основным источником поступления органического вещества (ОВ), в том числе органического углерода (ОУ), в Мировой океан [1]. Бореальная тайга, болота и торфяники криолитозоны — крупные резервуары ОУ и, следовательно, играют важную роль в его глобальном цикле [2]. Водосборы Арктического бассейна содержат в почвах более половины мирового запаса ОУ, преимущественно в мерзлом состоянии [3].

Органическое вещество в речных водах находится в растворенном (РОВ) и взвешенном (ВОВ) состояниях, в которых присутствует определенная доля органического углерода (РОУ и ВОУ соответственно). Их относительное молекулярное разнообразие уменьшается вниз по русловой сети [4]. Суммарные потоки РОУ в арктических реках России, а также характеристики его молекулярного и изотопного состава детально исследованы в рамках международных проектов: PARTNERS (2002–2006 гг.), Arctic-GRO (2009–2011 гг.), Arctic-GRO II (2012–2016 гг.) — на четырех крупнейших реках (Обь, Лена, Енисей, Колыма); ТОМСАР-Permafrost (2013–2015 гг.) — на р. Енисей [2, 5, 6]. Для крупнейших рек Сибири имеются также оценки потоков ВОУ и его доли в общей мутности воды, основанные на единичных пробоотборах [7].

Биолабильность ОУ определяется его возрастом, хотя на этот счет существуют противоречивые мнения [5]. В криолитозоне микроорганизмы селективно потребляют более старый ОУ, поступающий в гидрографическую сеть вследствие деградации мерзлоты, при таянии высокольдистых позднеплейстоценовых отложений (так называемый ледовый комплекс) [8]. Возраст ВОУ в среднем больше, нежели РОУ. Компиляция 1400 радиоуглеродных дат (по $\Delta^{14}\text{C}_{\text{DOC}}$) указывает на преобладание в растворенной фракции современного ОУ в реках криолитозоны (72 % датировок) [5], тогда как ВОУ намного древнее — возраст его колеблется от 4430 до 11 400 лет [9, 10]. Следовательно, возможное увеличение выноса ВОУ вследствие деградации криолитозоны, особенно на ее южном пределе, способно внести существенный вклад в поступление климатически релевантных газов в атмосферу Земли.

Поток углерода крупных сибирских рек формируется в верхних звеньях гидрографической сети, однако оценок валовых показателей стока ВОУ для малых рек криолитозоны, его доли в суммарном стоке взвешенных наносов в настоящее время нет [11]. Цель настоящей работы — количественная оценка органической составляющей стока взвешенных наносов малых водотоков Енисейского Севера в районе г. Игарки в меженный период.

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования проводились на базе комплексного стационара Института мерзлотоведения СО РАН «Игарка», в районе Игарки (Туруханский район Красноярского края); гидрометрические работы — на трех малых водосборах: руч. Малая Гравийка (площадь водосбора 1,5 км²), руч. Лисий Лог (24,7 км²) и р. Гравийка (323 км²) (рис. 1). Выбранные водосборы репрезентативны для региона исследований: на их территории антропогенное вмешательство отсутствует либо незначительно.

Современное правобережье р. Енисей в районе Игарки — пологая, крайне обводненная (заболоченная и заозеренная) поверхность, в пределах которой представлены три енисейские надпойменные террасы. Развитие гидрографической сети обусловлено различиями в литологии и характере растительности этой террасовой последовательности. Наиболее крупные реки территории, Гравийка и Черная, берут начало на поверхности третьей террасы (высотные отметки 50–70 м БС), ширина которой

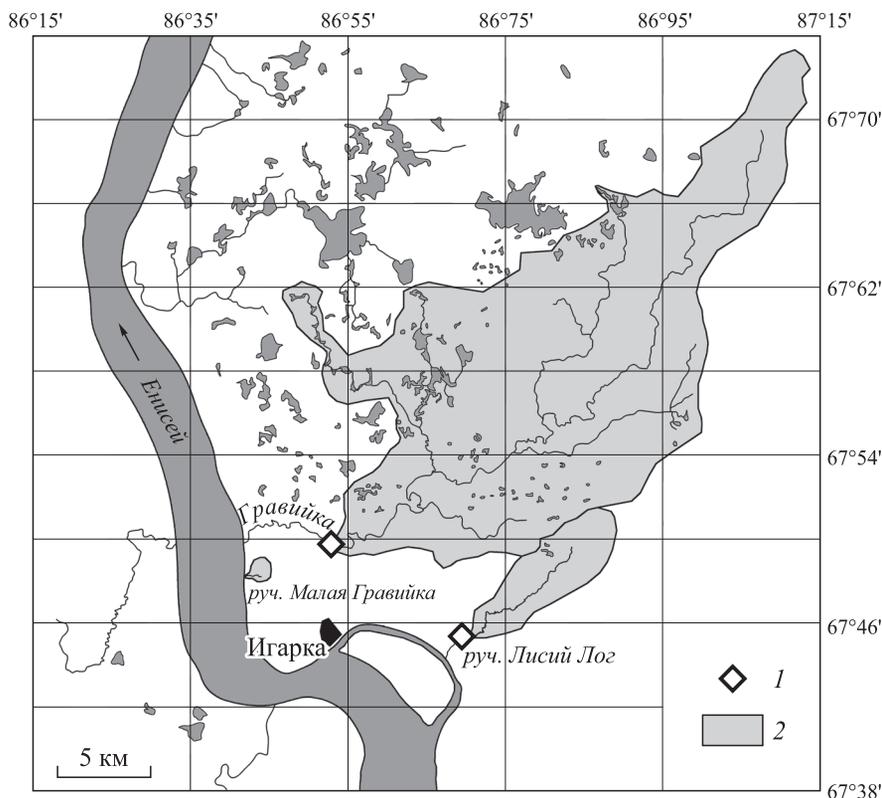


Рис. 1. Схема района исследований в окрестностях г. Игарки (Енисейский Север).

1 — гидрометрические створы; 2 — водосборы.

меняется от 5 до 15 км. Поверхность террасы занята преимущественно крупнобугристыми торфяниками. Накопление торфа в районе Игарки началось около 9,5 тыс. л. н., в раннеголоценовое время, и продолжалось с перерывами до 3,5 тыс. л. н., что подтверждается многочисленными радиоуглеродными датировками [12]. Мерзлота в торфяниках маломощная, формировалась в холодные отрезки голоцена [13]. В настоящее время происходит термоэрозийная диссекция бугров по трещинам, их оплывание, образование термокарстовых озер и крупных болотных массивов.

Небольшие водотоки берут начало в пределах второй (с отметками от 40 до 50 м БС) и первой (от 30 до 40 м БС) енисейских террас. Вторая терраса, поверхность которой сформировалась после прорыва крупного ледникового Игарского озера в середине каргинского интерстадиала (MIS 3) [13], сложена озерными глинами и перекрывающими их суглинками и супесями. Ширина второй террасы в районе Игарки — от 2 до 5 км. На залесенных участках формируется мерзлота несливающегося типа, где между кровлей плейстоценовой мерзлой толщи и современным сезонно-мерзлым слоем постоянно существуют таликовые области. В древостое преобладают лиственница (*Larix sibirica*), кедр (*Pinus sibirica*) и береза (*Betula* sp.), редко встречаются заболоченные участки со сфагновым покрытием. Поверхность террасы дренируют несколько малых водотоков — ручьи Медвежий, Волчий и Лисий Лог с площадями водосборов от 15 до 25 км². Малые водотоки первой террасы, занимающей узкую (не более 1,5 км) полосу вдоль русла Енисея, берут начало на переувлажненных торфяниках либо вытекают из озер.

Климат территории континентальный субарктический, с суровой продолжительной зимой и коротким прохладным летом. По данным метеостанции Игарка, среднегодовая температура воздуха составляет $-7,9$ °С, годовая сумма осадков — 485 мм (1936–2014 гг.). В гидрологическом отношении территория относится к слабоизученным. Единственный гидрологический пост, р. Гравийка–г. Игарка, действовал с перерывами с 1936 по 1992 г., в настоящее время законсервирован. Водный режим, по классификации Б. Д. Зайкова [14], приближается к восточносибирскому типу, с выраженным весенним половодьем во второй половине мая–первой половине июня. Дождевые паводки редко прослеживаются в гидрографе, поскольку существенный их объем поглощается болотными массивами и

обеспечивает базовый сток зимней межени у неперемежающихся водотоков (площадь водосбора свыше 100 км²). Осадки предзимнего периода, согласно данным наблюдений за изотопным составом речных вод, достигают русловой сети в марте–апреле, в период максимального развития сезонного промерзания [15]. Малые реки и ручьи окрестностей Игарки в зимнее время повсеместно перемерзают с образованием русловых наледей; отмечен случай пересыхания. В летний период русловой сток р. Гравийки сохраняется даже в самые засушливые и жаркие годы.

Пробы воды отбирались в пристреженной части исследованных водотоков с глубины 0,2–0,3 м с периодичностью 6–10 дней в августе и сентябре 2014 г. Всего отобрано и обработано 15 проб, из них шесть из р. Гравийки, пять — из руч. Лисий Лог и четыре — из руч. Малая Гравийка.

Для определения весовой мутности и органической составляющей взвеси нами был принят стандартный протокол Арктической программы долгосрочных наблюдений (Arctic LTER) [16]. Образцы воды в каждой точке наблюдений отбирали с помощью пластиковой бутылки объемом 1 л и сливали в общую емкость объемом 5 л. В лаборатории образцы фильтровали через стекловолоконные фильтры Whatman GF/F, предварительно прокаленные в течение 4 ч при температуре 450 °С и предвзвешенные, до полного прекращения фильтрации через фильтр (от 1 до 3 л, в зависимости от мутности). Фильтры с осадком высушивали в сушильном шкафу в течение 24 ч при температуре 45 °С, после чего взвешивали на весах I (специального) класса точности, определяя весовую мутность.

Определение содержания ВОВ проводили методом потерь при прокаливании (loss on ignition) [17] в лаборатории гидрохимии Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (определения выполнила Л. А. Духова). Фильтры с осадком помещали в тигли, предварительно прокаленные до постоянной массы, и записывали массу тигля с фильтром. Затем тигли выдерживали в муфельной печи в течение 2 ч при температуре 550 °С, охлаждали в камере печи до комнатной температуры и взвешивали с остатками фильтров. Отдельно для контроля записывали массу пустых тиглей после удаления остатков фильтра. Ошибка метода составляет около 2 % [16].

Детерминированная модель формирования речного стока «Гидрограф» [18] была адаптирована к условиям прерывистой криолитозоны водосбора Гравийки для расчетов суточных расходов воды в период 1993–2014 гг., для которого отсутствуют материалы наблюдений. Эти же данные были использованы для построения кривой транспорта наносов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мутность воды. Мутность воды (s) в период полевых работ была невысокой — от 2 до 18 мг/л, что типично для региона в целом. Так, мутность воды Гравийки была неизменно низкой (2–3 мг/л), причем выпадение осадков не отражалось ни на ходе уровней воды, ни на режиме мутности. На ручьях, напротив, формировались дождевые паводки, в результате чего мутность кратковременно возрастала в 2–3 раза. Мутность воды руч. Лисий Лог в августе–сентябре 2014 г. изменялась от 5 до 11 мг/л, руч. Малая Гравийка — от 1,93 до 17,7 мг/л.

Органическое вещество взвеси. Потери при прокаливании в целом по коллекции фильтров составили 2,3–5,8 мг (табл. 1). В абсолютном выражении среднее содержание ВОВ в речных водах $s_{\text{орг}}$ незначительно изменяется от водосбора к водосбору: р. Гравийка — 1,63 мг/л, руч. Лисий Лог — 2,02, руч. Малая Гравийка — 2,42 мг/л. Принимая, в отсутствие фактических данных, долю углерода в ВОВ, равной 0,45 [19], получаем, что средняя концентрация ВОУ изменяется от 0,73 мгС/л в р. Гравийке до 1,09 мгС/л в руч. Малая Гравийка. Эти результаты сопоставимы с ранее опубликованными данными для севера Средней Сибири — от 0,31 мгС/л в эстуарии р. Енисей (Енисейский залив) до 0,81 мгС/л в водах р. Оленёк [7].

Доля ВОВ в суммарной мутности $p_{\text{орг}}$ в период работ изменялась от 16,3 до 74,1 %, что в несколько раз превышает ранее опубликованные значения для крупнейших рек Российской Арктики [7]. Доля ВОВ составляет больше половины в общей мутности в водах р. Гравийки (59 %) и руч. Малая Гравийка (50,5 %) и существенно меньше — в водах руч. Лисий Лог (26,2 %).

Величина $p_{\text{орг}}$ обратно пропорциональна общей мутности воды. Для малых рек, где преобладающая часть ВОВ аллохтонная, такой характер связи определяется преимущественной мобилизацией минеральных частиц в период прохождения дождевых паводков [1]. В водах исследованных водотоков в летне-осенний период такая зависимость имеет обратный степенной вид (рис. 2):

$$p_{\text{орг}} = 1,073s^{-0,614}, \quad (1)$$

где s — общая мутность воды, мг/л.

Таблица 1

Измеренная мутность воды исследованных водотоков (2014 г.)

Образец	Водоток	Дата отбора	Масса чистого фильтра, г	Объем пробы, л	Масса фильтра с наносами, г	Масса наносов, г	Мутность s , мг/л
2014-t.GR	Гравийка	10 августа	0,1278	1,5	0,1338	6	4,0
2014-01.FC	Лисий Лог	17 августа	0,1266	1,0	0,1352	8,6	8,6
2014-01.GR	Гравийка	17 августа	0,1271	2,0	0,1323	5,2	2,6
2014-01.LG	Малая Гравийка	28 августа	0,1252	2,0	0,1300	4,8	2,4
2014-02.GR	Гравийка	1 сентября	0,1262	2,0	0,1306	4,4	2,2
2014-02.FC	Лисий Лог	1 сентября	0,1269	1,0	0,1354	8,5	8,5
2014-02.LG	Малая Гравийка	1 сентября	0,1270	1,0	0,1358	8,8	8,8
2014-03.GR	Гравийка	10 сентября	0,1262	2,0	0,1315	5,3	2,65
2014-03.FC	Лисий Лог	10 сентября	0,1267	1,3	0,1332	6,5	5,0
2014-03.LG	Малая Гравийка	17 сентября	0,1264	2,0	0,1619	35,5	17,7
2014-04.GR	Гравийка	20 сентября	0,1241	2,0	0,1297	5,6	2,8
2014-04.FC	Лисий Лог	20 сентября	0,1239	1,53	0,1407	16,8	11,0
2014-03.LG	Малая Гравийка	24 сентября	0,1245	3,0	0,1303	5,8	1,93
2014-05.GR	Гравийка	26 сентября	0,1246	2,0	0,1291	4,5	2,25
2014-05.FC	Лисий Лог	26 сентября	0,1254	2,0	0,1395	14,1	7,05

Из общего вида зависимости ясно, что при прохождении максимальных расходов воды лишь первые проценты общего стока взвешенных наносов будут относиться к органической составляющей, хотя ее абсолютная величина, вследствие прямой связи между расходом и мутностью воды, также максимальна в половодья и паводки. Для периода половодья, при сохранении общего вида зависимости, ее коэффициенты могут быть иными.

Источники поступления ОВ в водотоки. Полученные в результате полевых исследований данные характеризуют содержание органического материала в речном стоке меженного периода. Реакция водотоков на отдельные эрозионные события позволяет судить о степени их сопряженности с водосборами при прохождении дождей.

Как отмечалось выше, водосбор Гравийки — система с выраженной буферной ролью, слабо реагирующая на выпадение осадков. Последние расходуются на компенсацию дефицита влаги, связанного с активной транспирацией, а также задерживаются в придолинных низовых болотах, осуществляющих регулирование стока [20]. Содержание ВОУ снижается от лета к осени, отражая замедление развития фитопланктонных сообществ. В это время водоток, следовательно, отделен от своего водосбора.

Ручей Лисий Лог имеет повышенную мутность и постоянно малую величину $p_{орг}$, что, по нашему мнению, позволяет считать локальные русловые деформации (размыв русла и берегов) основным источником поступления минерального материала в поток. Поскольку доля органики во взвеси в период прохождения дождевого паводка во второй половине сентября (20.09.2014) сохраняется неизменно низкой (достигает минимума) при увеличении мутности, источник наносов в ручье и в это время остается прежним. Следовательно, эрозионная реакция водосбора на паводок также незначительна, и изменение содержания ВОВ полностью определяется значением общей мутности.

В водах руч. Малая Гравийка сильное «разбавление» органики взвеси терригенным минеральным веществом наблюдается лишь в один из дождевых эпизодов (вторая половина сентября).

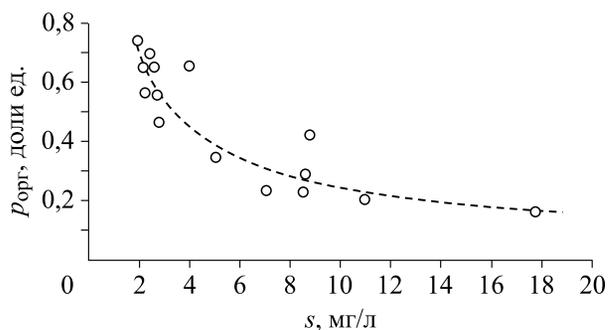


Рис. 2. Связь доли взвешенного органического вещества ($p_{орг}$) с общей мутностью воды (s) для трех исследованных водотоков по данным полевых наблюдений 2014 г.

Характеристики взвешенного органического вещества в отобранных образцах воды (2014 г.)

Образец	Водоток	Дата отбора	Мутность s , мг/л	Остаток на фильтре, г	Потери при прокаливании, г	$\rho_{\text{орг}}$, %	$s_{\text{орг}}$, мг/л
2014-t.GR	Гравийка	10 августа	4,0	0,0060	0,0039	65,5	2,62
2014-01.FC	Лисий Лог	17 августа	8,6	0,0086	0,0025	28,7	2,47
2014-01.GR	Гравийка	17 августа	2,6	0,0052	0,0034	65,0	1,69
2014-01.LG	Малая Гравийка	28 августа	2,4	0,0048	0,0033	69,6	1,67
2014-02.GR	Гравийка	1 сентября	2,2	0,0044	0,0029	65,0	1,43
2014-02.FC	Лисий Лог	1 сентября	8,5	0,0085	0,0020	23,2	1,97
2014-02.LG	Малая Гравийка	1 сентября	8,8	0,0088	0,0037	41,9	3,69
2014-03.GR	Гравийка	10 сентября	2,65	0,0053	0,0029	55,5	1,47
2014-03.FC	Лисий Лог	10 сентября	5,0	0,0065	0,0023	34,8	1,74
2014-03.LG	Малая Гравийка	17 сентября	17,7	0,0355	0,0058	16,3	2,89
2014-04.GR	Гравийка	20 сентября	2,8	0,0056	0,0026	46,4	1,30
2014-04.FC	Лисий Лог	20 сентября	11,0	0,0168	0,0035	20,6	2,26
2014-03.LG	Малая Гравийка	24 сентября	1,93	0,0058	0,0043	74,1	1,43
2014-05.GR	Гравийка	26 сентября	2,25	0,0045	0,0025	56,7	1,27
2014-05.FC	Лисий Лог	26 сентября	7,05	0,0141	0,0033	23,7	1,67

В начале сентября (пробоотбор 01.09.2014; табл. 2) значение $s_{\text{орг}}$ достигает максимума при средней в целом величине мутности, что говорит о наличии внешнего (относительно речного русла) источника ОВ, которым в условиях данного водосбора может быть только поверхностный либо быстрый подповерхностный сток в органическом горизонте почвы.

Сток наносов и органического вещества р. Гравийки. Малые водотоки территории слабо освещены данными гидрометрических наблюдений. Существующих рядов наблюдений на стационаре «Игарка» недостаточно для расчета характеристик современного стока взвешенных наносов и органического вещества. По этой причине в работе использованы данные гидрологического поста в створе р. Гравийка–г. Игарка за период наблюдений 1938–1992 гг., опубликованные в гидрологических ежегодниках [21].

По данным наблюдений за мутностью воды в 2012–2014 гг. и с использованием смоделированных суточных расходов воды для р. Гравийки было получено уравнение кривой транспорта наносов [22], которое имеет степенной вид с аддитивной константой смещения (рис. 3):

$$s = 0,0017Q^{2,04} + 4,35, \quad (2)$$

где Q — расход воды, м³/с. Такой вид хорошо подходит для нелинейной аппроксимации небольших наборов данных с существенным разбросом точек [23]. Коэффициенты получены методом нелинейной регрессии, в качестве метода оптимизации использован алгоритм Левенберга–Марквардта. Спорный нюанс использования такого вида зависимости — постоянное ненулевое значение мутности при нулевом расходе воды, численно равное аддитивной константе (4,35 мг/л), однако группировка точек в левом нижнем углу графика (см. рис. 3) оправдывает применимость такого подхода.

С использованием уравнения (2) для периода инструментальных наблюдений (1938–1992 гг.) рассчитаны ежедневные величины мутности воды, концентрации ВОВ и ВОУ, в дальнейшем осредненные по годам. Средний расход воды за этот период со-

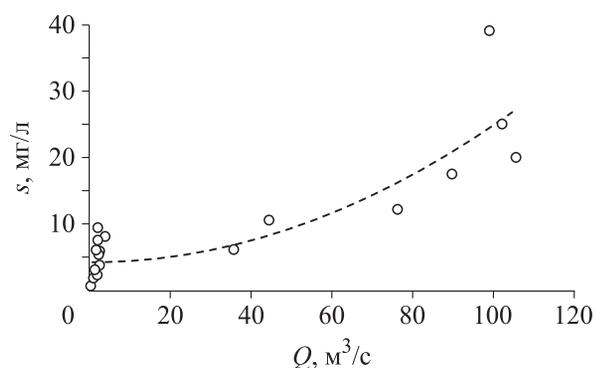


Рис. 3. Кривая транспорта наносов (створ р. Гравийка–г. Игарка), полученная по данным полевых наблюдений 2012–2014 гг.

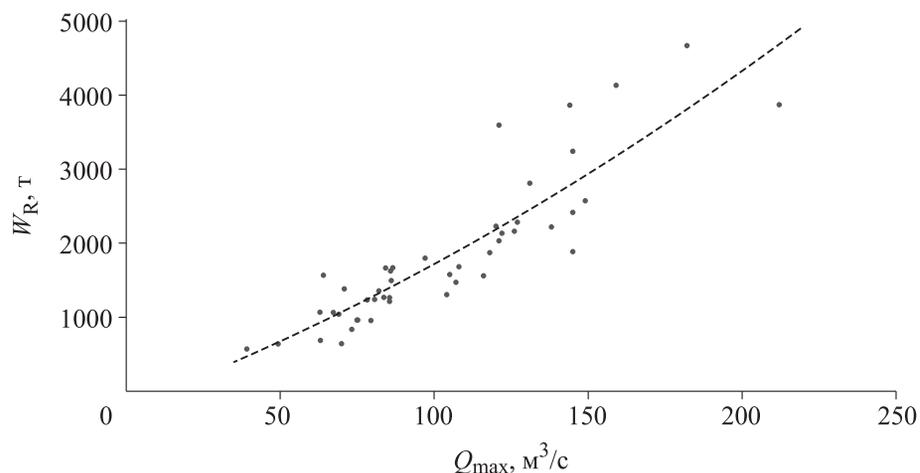


Рис. 4. Степенная связь годового стока взвешенных наносов (W_R) с максимальным расходом воды (Q_{\max}) для периода инструментальных наблюдений (1938–1992 гг.) в створе р. Гравийка–г. Игарка.

ставил $5,08 \text{ м}^3/\text{с}$, модуль стока — $15,7 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. Среднегодовой объем стока взвешенных наносов в створе р. Гравийка–г. Игарка равен 1823 т. Подавляющая часть этого объема (более 90 %) проходит через створ поста в период половодья, а около 50 % — в день с максимальным суточным расходом воды. Вследствие этого годовой сток взвешенных наносов W_R тесно связан с максимальным расходом воды Q_{\max} (рис. 4):

$$W_R = 3,487Q_{\max}^{1,345}.$$

Валовые характеристики потока ОВ, напротив, связаны с объемом годового стока воды W_Q (млн м^3). Для потоков ВОВ и ВОУ получены соответствующие уравнения:

$$\text{ВОВ} = 0,84W_Q^{1,216}.$$

$$\text{ВОУ} = 0,378W_Q^{1,216}.$$

Среднегодовой поток ВОВ за период инструментальных наблюдений составил 406 т, или $1,26 \text{ т}/\text{км}^2$ в единицах слоя; поток ВОУ — 183 т/год, или $0,57 \text{ т}/\text{км}^2$. Приведенные количественные оценки предварительные и представляются заниженными, поскольку получены по региональному уравнению (1) и не учитывают возможных отклонений от этого уравнения в период половодья. Во время прохождения максимальных расходов возможно дополнительное поступление ОВ как с водосборной площади, так и с поверхности поймы.

Органическое вещество взвеси и ландшафтные условия. Наблюдаемые средние доли ВОВ в общей мутности тесно связаны с литологией исследованных водосборов. При различающемся содержании ВОВ средние значения $\rho_{\text{ВОВ}}$ практически одинаковы для водосборов р. Гравийки и руч. Малая Гравийка, где широко представлены заболоченные поверхности, крупнобугристые торфяники и термокарстовые озера. Водосбор руч. Лисий Лог сложен супесями и суглинками и существенно залесен, доля ВОВ в мутности здесь значительно ниже.

Литологическое строение водосборов связано с их геоморфологическим положением в системе енисейских террас. Торфяники с проявлениями активного термокарста занимают поверхности первой и третьей террас, супесчано-суглинистые почвы распространены на второй террасе. Бассейновая эрозия на террасовых поверхностях, по меньшей мере в летний период, подавлена малыми градиентами высот, большим влиянием локальных бессточных понижений и небольшим потенциалом поверхностного стока, вследствие чего высокая мутность связана с локальными русловыми переформированиями. Следовательно, ландшафтные и литологические особенности территории, обусловленные историей ее развития, определяют характеристики стока наносов и потоков ОВ исследованных рек, наравне с современными гидроклиматическими условиями. Без учета этих особенностей применять результаты данной работы к другим регионам некорректно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На трех исследованных водотоках тундрово-таежной зоны Енисейского Севера в период летне-осенней межени абсолютное содержание ВОВ составляет 1,63–2,42 мг/л и незначительно варьирует от водосбора к водосбору. Относительный вклад ВОВ в общую мутность изменяется от 16,4 до 74,1 % и зависит от ландшафтно-геоморфологических условий формирования стока взвешенных наносов.

Поглощение выпадающих осадков болотными массивами в бассейне Гравийки приводит к отсутствию выраженных дождевых паводков, а также ограничивает потенциал бассейновой эрозии. Поступление в воду Гравийки взвешенных наносов, в том числе ОВ, в меженный период обусловлено процессами в зоне потамали. Основной источник поступления минерального материала в руч. Лисий Лог как в межень, так и во время прохождения дождей и следующих за ними паводков — локальные русловые деформации. Содержание ВОВ практически не меняется во время паводков и полностью определяется значением общей мутности. Поверхностный либо быстрый подповерхностный сток в органическом горизонте почвы служит внешним источником ОВ в воды руч. Малая Гравийка и способствует повышению его содержания во взвеси при прохождении некоторых паводков.

В многолетнем разрезе доля ВОВ в годовом стоке взвешенных наносов Гравийки составляет 25 %, доля ВОУ — 11 %; в абсолютных величинах — 406 и 183 т соответственно. Следовательно, можно предположить, что расчет стока взвешенных наносов без поправки на его органическую составляющую завышает оценки выноса минеральных частиц и темпов денудации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (14–35–50138–мол_нр).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Meybeck M.** Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers // *American Journ. of Science.* — 1982. — Vol. 282. — P. 401–450.
2. **Amon R., Rinehart A., Duan S., Louchouart P., Prokushkin A., Guggenberger G., Bausch D., Stedmon C., Raymond P., Holmes R., McClelland J., Peterson B., Walker S., Zhulidov A.** Dissolved organic matter sources in large Arctic rivers // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* — 2012. — Vol. 94. — P. 217–237.
3. **Tarnocai C., Canadell J., Schuur E., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S.** Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles.* — 2009. — Vol. 23 [Электронный ресурс]. — <http://dx.doi.org/10.1029/2008GB003327> (дата обращения 12.01.2016).
4. **Vannote R., Minshall G., Cummins K., Sedell J., Cushing C.** The river continuum concept // *Canadian Journal of Fish and Aquatic Science.* — 1980. — Vol. 37 (1). — P. 130–137.
5. **Myers-Pigg A., Louchouart P., Amon R., Prokushkin A., Pierce K., Rubtsov A.** Labile pyrogenic dissolved organic carbon in major Siberian rivers: Implications for wildfire-stream metabolic linkages // *Geophysical Research Letters.* — 2015. — Vol. 42 [Электронный ресурс]. — <http://dx.doi.org/10.1002/2014GL062762> (дата обращения 12.01.2016).
6. **Marwick T., Tamooh F., Teodoru C., Borges A., Darchambeau F., Bouillon S.** The age of river-transported carbon: a global perspective // *Global Biogeochemical Cycles.* — 2015. — Vol. 29 (2). — P. 122–137.
7. **Lobbes J., Fitznar H., Kattner G.** Biogeochemical characteristics of dissolved and particulate organic matter in Russian rivers entering the Arctic ocean // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* — 2000. — Vol. 64. — P. 2973–2983.
8. **Mann P., Eglinton T., McIntyre C., Zimov N., Davydova A., Vonk J., Holmes R., Spencer R.** Utilization of ancient permafrost carbon in headwaters of Arctic fluvial networks // *Nature Communications.* — 2015. — Vol. 6 [Электронный ресурс]. — <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms8856> (дата обращения 12.01.2016).
9. **Guo L., Ping C.-L., Macdonald R.** Mobilization pathways of organic carbon from permafrost to Arctic rivers in a changing climate // *Geophysical Research Letters.* — 2007. — Vol. 34 [Электронный ресурс]. — <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL030689> (дата обращения 12.01.2016).
10. **Gustafsson O., van Dongen B., Vonk J., Dudarev O., Semiletov I.** Widespread release of old carbon across the Siberian Arctic echoed by its largest rivers // *Biogeosciences.* — 2011. — Vol. 8. — P. 1737–1743.
11. **Madej M. A.** The role of organic matter in sediment budgets in forested terrain // *IAHS-AISH Publication.* — 2005. — Issue 292. — P. 9–15.
12. **Левковская Г. М., Кинд Н. В., Завельский Ф. С., Форова В. К.** Радиоуглеродные датировки торфяников района г. Игарки и голоценовая стратиграфия Западной Сибири // *Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода.* — 1980. — Т. 37. — С. 94–101.
13. **Astakhov V., Isayeva L.** The ‘Ice Hill’: an example of ‘retarded deglaciation’ in Siberia // *Quaternary Science Reviews.* — 1988. — Vol. 7. — P. 29–40.

14. **Зайков Б. Д.** Средний сток и его распределение в году на территории СССР // Труды НИУ ГУГМС. Сер. IV. — 1946. — Вып. 15. — 146 с.
15. **Streletsky D., Tananaev N., Opel T., Shiklomanov N., Nyland K., Streletskaya I., Tokarev I., Shiklomanov A.** Permafrost hydrology in changing climatic conditions: seasonal variability of stable isotope composition in rivers in discontinuous permafrost // Environmental Research Letters. — 2015. — Vol. 10 [Электронный ресурс]. — <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/095003> (дата обращения 12.01.2016).
16. **Arctic LTER Streams Protocol 2015** [Электронный ресурс]. — <http://ecosystems.mbl.edu/ARC/streams/Arctic%20LTER%20Streams%20Protocol%202015.pdf> (дата обращения 22.12.2015).
17. **Heiri O., Lotter A., Lemcke G.** Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // Journ. of Paleolimnology. — 2001. — Vol. 25. — P. 101–110.
18. **Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А.** Математическое моделирование в гидрологии. — М.: Академия, 2010. — 366 с.
19. **Chester R.** Marine geochemistry. — London: Blackwell Sci., 2003. — 506 p.
20. **Тананаев Н. И.** Гидрогеохимические трассеры в оценке источников питания малых рек тундрово-таежной зоны // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XXI совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием). — Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2015. — С. 301–306.
21. **Государственный водный кадастр.** Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1: РСФСР; вып. 12: Бассейны Енисея (без Ангары) и Пясины. — Красноярск: Краснояр. террит. управление по гидрометеорологии, 1985. — 464 с.
22. **Тананаев Н. И.** Основные составляющие денудации на водосборах Енисейского Севера // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. — Якутск: Изд. дом Северо-Вост. федер. ун-та, 2015. — С. 483–486.
23. **Tananaev N.** Fitting sediment rating curves using regression analysis: a case study of Russian Arctic rivers // Proceedings IAHNS. — 2015. — Vol. 367. — P. 193–198.

Поступила в редакцию 17 февраля 2016 г.