
КАЧЕСТВО И ОХРАНА ВОД,
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 551.465

ВЫНОС БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ С РЕЧНЫМ СТОКОМ БАСЕЙНА СЕЛЕНГИ

© 2012 г. З. И. Хажеева, А. М. Плюснин*

Байкальский институт природопользования СО РАН

670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

E-mail: zkhazh@binm.bscnet.ru

***Геологический институт СО РАН*

670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а

E-mail: plyusnin@gin.bcsnet.ru

Поступила в редакцию 21.10.2010 г.

Проведен анализ осредненных данных многолетних наблюдений за изменением концентраций минеральных форм биогенных элементов, а также оценено общее их содержание в реках Селенга, Чикой, Хилок, Уда, Джиды, Темник. Дана характеристика ежемесячной изменчивости концентраций основных биогенных веществ и определены их соотношения в течение года. На основе показателей водного стока рек и концентраций биогенных веществ оценен их внутригодовой вынос реками. Выявлены характерные колебания в соотношениях выносимых реками общих и минеральных форм биогенных элементов. Установлено, что доля минеральных компонентов в общем поступлении в дельту р. Селенги с речным стоком $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ составляют соответственно 82 и 22%.

Ключевые слова: внутригодовая и межгодовая изменчивость минеральных форм азотных соединений, минеральный и общий фосфор, вынос биогенных элементов стоками рек бассейна Селенги.

Речной сток — главный фактор формирования гидрохимической основы биологической продуктивности вод рек [9, 6, 20]. Биогенные вещества (БВ), поступающие с речным стоком, служат источником питания для гидробионтов (бактерио-, фито- и зоопланктона), влияют на биопродуктивный потенциал озерных вод и определяют трофический статус отдельных акваторий озера. Содержание БВ в реках служит комплексной характеристикой биогеохимических процессов в природных водах. Оно отражает динамику естественной трансформации вещества — интенсивность образования и выноса продуктов выветривания горных пород, растворения осадочных пород, эрозии почв, образования и распада органического вещества, а также антропогенного воздействия на окружающую среду обитания (прямые сбросы в водоемы промышленно-бытовых сточных вод и отходов сельскохозяйственного производства).

Водосборы рек бассейна Селенги существенно различаются по своим почвенно-геологическим условиям, хозяйственной освоенности и природопользованию. Эти факторы, а также режим питания рек на фоне межгодовой изменчивости климатических характеристик влияют на условия формирования водного и химического стока рек, на состав компонентов, качество речных вод и на санитарное состояние водных ресурсов. Притоки

р. Селенги различаются между собой по минерализации в 1.5–2 раза. Минерализация вод невысока — в среднем 70–210 мг/л, что определяется особенностью подстилающих древнейших кристаллических и метаморфических пород (граниты, гнейсы, гранито-диориты, магматиты и др.). Воды рек относятся к гидрокарбонатному кальциевому типу.

Гидрохимический режим рек бассейна Селенги остается недостаточно изученным. Выполненные ранее исследования химического состава воды этой реки показали, что внутригодовая и межгодовая динамика содержания биогенных элементов определяется как природными, так и антропогенными факторами. С 2001 г. институтами СО РАН ведутся ежеквартальные мониторинговые наблюдения за качеством воды р. Селенги в нижнем течении и в устьях проток ее дельты. Так, средневзвешенная концентрация минерального фосфора ($P_{\text{мин}}$) в воде Селенги в 1950-е гг. не превышала 13 мкг Р/л, а в 1990-е гг. составила 21 мкг Р/л [3–5, 10, 11, 16–19]. В [18] приведен анализ результатов многолетних режимных наблюдений за изменением объема выноса биогенных элементов речным стоком Селенги в разные периоды.

В задачу настоящей работы входило изучение сезонной и межгодовой изменчивости концентраций биогенных элементов в речных водах бас-



Рис. 1. Карта-схема района исследований. цифры — участки отбора проб.

сейна Селенги и определение объема выноса их речным стоком в условиях низкой водности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гидрохимические наблюдения проводились с 2002 по 2009 г. на девяти станциях в различные сезоны года (рис. 1), включая следующие периоды: подледный (декабрь, февраль), после вскрытия ото льда (май—июнь), в пик вегетации (конец июня — начало августа) и осеннего охлаждения вод (сентябрь—октябрь). В табл. 1 приведены да-

ты отбора проб и соответствующие им расходы воды в створах наблюдений. Пробы воды отбирались пластиковыми батометрами объемом 2 л. Пробы для определения O_2 методом Винклера отбирались в калиброванные склянки, для определения содержания БВ в пластиковые бутылки объемом 1,5 л. До проведения анализов пробы хранились не более 2 сут при $T = 5-7^\circ C$.

Комплекс проведенных работ был достаточно обширен. Исследованы такие параметры как температура воды (T), pH, Eh, концентрации O_2 .

Таблица 1. Расходы воды Q , м³/с, в створах наблюдения по данным БУГМС в 2002–2009 гг.

Даты отбора	Номера и названия створов отбора проб								
	р. Селенга				р. Чикой	р. Хилук	р. Уда	р. Джида	р. Темник
	1, пос. Наушки	2, с. Ново-селенгинск	3, рзд. Мо-стовой	4, пос. Ка-банск	5, с. Пово-рот	6, с. Хайла-стуй	7, г. Улан-Удэ	8, пос. Джида	9, с. Улан-Удунга
2002 г.									
21.03–02.03	57.4	149	184	163	30.4	6.03	19	5.30	1.83
15.04–16.04	253	716	437	456	553		27.8	65.3	4.3
17.05–19.05	302	870	1790	1690	481	447	267		
14.06–15.06	249	646	856	1050	264	132	59.6	137	43.8
15.07–16.07	324	1150	1410	1190	348	161	124	607	74.5
14.08–15.08	216	594	731	827	382	125	60.7	112	35.8
16.09–17.09	209	434	510	565	215	83.9	40.4	73.1	34.4
14.10–15.10	219	400	486	518	162	81.8	39.7	83.5	28.9
2003 г.									
24.03–25.03	40.8	74.9	93.4	119	15.3	3.44	16.4	3.96	1.23
17.04–18.04	219	362	910	330	78.7	51.5	27.3	57.8	3.74
19.05–20.05	277	546	863	954	271	87.9	50.8	156	52.6
16.06–17.06	282	574	653	811	210	64.4	37.3	118	40.7
17.07–18.07	239	513	552	609	155	60.5	32.5	127	28.7
16.08–17.08	692	1290	1470	1610	446	84	85.3	326	80.3
18.09–19.09	659	1640	1740	2080	496	140	69.4	252	37.7
17.10–18.10	358	846	989	1270	215	109	61.8	143	31.6
2004 г.									
28.02–01.03	39.2	90.4	112	144	28.6	4.09	11.8	7.64	1.41
21.03–22.03	45.5	108	128	162	32.2	5.15	16.4	9.31	1.81
15.04–16.04	562	278	872	298	88.8		44.3		
18.05–19.05	318	912	1100	1430	503	225	95.5	121	246
14.06–15.06	272	1010	849	970	287	108	88.5	171	114
15.07–16.07	363	840	978	1260	361	101	75.7	116	61.4
14.08–15.08	297	624	842	843	212	73.7	53.9	125	38.9
16.09–17.09	286	594	623	716	206	67.6	46.9	114	53.7
14.10–15.10	274	560	583	646	179	65.6	43.8	123	32.6
2005 г.									
26.02–27.02	36.6	56.8	83.2	85.8	21.3		6.55		
24.03–25.03	37.1	62.1	88.1	103	22.8	4.0	11.7	6.5	1.86
17.04–18.04	264	265	413	261	56.1	13.4	25.8	57.3	16.8
19.05–20.05	309	695	1420	1070	483	286	124	148	47.9
16.06–17.06	328	1330	1740	1650	930	313	138	156	107
17.07–18.07	260	817	1180	1140	608	157	71.6	123	42.1
16.08–17.08	461	1120	1440	1380	329	93.0	62.6	375	75.5
18.09–19.09	318	742	1020	855	266	87.4	56.9	195	55.9
17.10–18.10	282	520	802	710	209	108	70.3	91.3	32.9

Таблица 1. Окончание

Даты отбора	Номера и названия створов отбора проб								
	р. Селенга				р. Чикой	р. Хилок	р. Уда	р. Джида	р. Темник
	1, пос. Наушки	2, с. Ново-селенгинск	3, рзд. Мо-стовой	4, пос. Ка-банск	5, с. Пово-рот	6, с. Хайла-стуй	7, г. Улан-Удэ	8, пос. Джида	9, с. Улан-Удунга
2006 г.									
28.02–01.03	30.9	47.5	61.2	78.9	15.3	4.27	8.43	3.83	0.39
22.03–23.03	36.1	62.6	79.3	102	16.5	4.64	12.4	6.70	1.67
15.04–16.04	98.5	169	159	264	36.8	7.22	23.7	20.5	4.73
18.05–19.05	343	701	1040	1080	266	245	142	68.8	43.8
14.06–15.06	357	888	1350	1500	425	164	136	42.4	64.8
15.07–16.07	1650	2480	3090	2970	550	152	89.6	841	140
14.08–15.08	417	1080	1300	1430	266	75.8	64.3	178	57.0
16.09–17.09	283	707	906	932	257	73.6	61.7	108	48.5
14.10–15.10	288	560	682	712	187	67.7	60.5	129	34.8
2007 г.									
26.02–27.02	44.7	72.9	104	103	25.1	4.2	9.70	9.6	1.44
24.03–25.03	51.2	71.2	103	143	21.2	5.29	16.3	11.1	1.77
17.04–18.04	326	487	724	368	68.9		54.9		
19.05–20.05	314	604	890	843	273	123	82.8	48.1	35.8
16.06–17.06	310	787	818	767	218	86.9	111	41.5	91.2
17.07–18.07	241	678	842	779	247	83.5	79.8	322	46.1
16.08–17.08	252	513	674	572	195	44.9	54.9	148	44.2
18.09–19.09	349	764	914	817	234	45.9	53.0	193	85.6
17.10–18.10	263	487	618	579	145	38.9	53.0	105	27.7
2008 г.									
27.02–28.02	38.9	33.1	81.5	80.3	9.6	3.11	8.82	7.26	1.11
22.03–23.03	53.8	84.7	113	131	13.2	8.67	15.7	15.4	1.8
15.04–16.04	324	446	631	572	130	24.4	53.3	48.4	8.45
18.05–19.05	217	387	558	541	145	70.4	73.8	44.8	32.2
14.06–15.06	232	455	810	654	171	103	131	167	51.0
15.07–16.07	457	1360	1630	1540	581	127	102	245	74.4
14.08–15.08	379	956	1280	1460	234	86.9	87.8	232	36.5
16.09–17.09	421	1070	1310	1220	370	103	73.8	286	64.7
14.10–15.10	302	584	810	743	209	82.3	65.5	86	29.2
2009 г.									
26.02–27.02	42.4	62.8	54.8	56.1	12.3	3.3	9.74	4.65	1.16
22.03–23.03	49.4	59.1	92.1	107	13.6	4.8	12.5	10.5	2.02
15.04–16.04	141	793	806	831	151	48.2	64.4	77.2	22.7
18.05–19.05	297	494	866	902	157	82.5	84.5	36.4	30.8
14.06–15.06	306	517	666	620	144	125	81.2	43.9	67.5
15.07–16.07	520	1010	1370	1280	512	152	68.6	110	30.2
14.08–15.08	362	1100	1450	1520	479	86	96.4	236	79.6
16.09–17.09	432	840	1050	1120	415	74	71.5	106	31.8
14.10–15.10	285	747	1120	1240	387	52.3	84.5	84.4	37.6

Таблица 2. Концентрации соединений N, P, Si, мкг элемента/л, в речных водах бассейна Селенги в 2002–2009 гг. (числитель – диапазон изменений средневзвешенных концентраций по месяцам, знаменатель – среднегодовые концентрации за период наблюдений)

Параметр	Реки							
	Селенга			Чикой	Хилок	Уда	Джида	Темник
	пос. Наушки	рзд. Мостовой	пос. Кабанск					
N-NH ₄ ⁺	$\frac{4-116}{56}$	$\frac{9-219}{96}$	$\frac{12-218}{98}$	$\frac{8-148}{82}$	$\frac{9-156}{68}$	$\frac{7-145}{68}$	$\frac{9-152}{61}$	$\frac{4-106}{32}$
N-NO ₂ ⁻	$\frac{0-22}{4}$	$\frac{0-14}{3}$	$\frac{0-16}{5}$	$\frac{0-13}{2}$	$\frac{0-9}{2}$	$\frac{0-14}{2}$	$\frac{0-2}{1}$	$\frac{0-2}{1}$
N-NO ₃ ⁻	$\frac{23-325}{114}$	$\frac{48-522}{286}$	$\frac{46-525}{298}$	$\frac{28-482}{196}$	$\frac{31-492}{178}$	$\frac{15-364}{162}$	$\frac{17-372}{176}$	$\frac{15-324}{145}$
N _{мин}	$\frac{23-458}{142}$	$\frac{59-758}{386}$	$\frac{64-732}{378}$	$\frac{22-610}{241}$	$\frac{19-540}{226}$	$\frac{16-506}{197}$	$\frac{14-528}{212}$	$\frac{11-382}{175}$
N _{общ}	36(173)–552	$\frac{67-924}{471}$	$\frac{72-898}{461}$	$\frac{68-744}{356}$	$\frac{73-658}{342}$	$\frac{44-617}{254}$	$\frac{38-643}{261}$	$\frac{27-463}{201}$
N _{орг}	$\frac{18-95}{31}$	$\frac{15-192}{93}$	$\frac{12-168}{83}$	$\frac{8-134}{62}$	$\frac{7-118}{58}$	$\frac{5-111}{44}$	$\frac{18-115}{56}$	$\frac{12-83}{38}$
P-PO ₄ ³⁻	$\frac{1-14}{7}$	$\frac{1-26}{9}$	$\frac{1-29}{12}$	$\frac{1-18}{8}$	$\frac{1-32}{11}$	$\frac{1-22}{8}$	$\frac{1-28}{9}$	$\frac{1-21}{7}$
P _{общ}	$\frac{4-67}{28}$	$\frac{15-125}{58}$	$\frac{16-129}{59}$	$\frac{1-48}{28}$	$\frac{5-98}{37}$	$\frac{5-58}{32}$	$\frac{6-48}{25}$	$\frac{6-30}{18}$
Si × 10 ⁻³	$\frac{2.7-4.9}{3.8}$	$\frac{3.1-5.2}{3.8}$	$\frac{2.8-5.4}{3.9}$	$\frac{2.9-4.9}{3.8}$	$\frac{2.6-5.1}{4.1}$	$\frac{2.2-6.5}{5.2}$	$\frac{2.8-5.2}{3.5}$	$\frac{2.6-4.4}{3.3}$
Количество проб	70	70	70	70	66	70	66	66

форм P: P_{мин} и P_{общ}; форм N: N_{мин} (аммонийного N-NH₄⁺), нитритного (N-NO₂⁻) и нитратного (N-NO₃⁻) и N_{общ}; Si. При этом использовались общепринятые, многократно проверенные методики [7, 12, 14, 18]. Колометрирование выполнялось на спектрофотометре UV-VIS фирмы "Marada" (Япония). Для анализа растворенных БВ фильтровали 1–2 л воды через стекловолокнистый фильтр GF-F с диаметром пор 0.5 мкм. Расчет выноса БВ проведен по известной методике О.А. Алекина [1, 2].

В табл. 2 приведены итоговые результаты определений концентраций БВ, причем в числителе указан диапазон изменений по месяцам средневзвешенных концентраций C_i , рассчитанных по формуле

$$C_i = \frac{\sum_{n=1}^8 C_n Q_n}{\sum_{n=1}^8 Q_n},$$

где Q_n – расход воды в месте отбора пробы (табл. 1), в знаменателе – среднесреднеголетняя концентрация в период наблюдений, рассчитанная как среднеарифметическая средневзвешенных концентраций в течение года в створе наблюдения. Для полноты анализируемых данных привлекались данные Бурятского управления гидрометеорологической службы (БУГМС) с 2002 по 2009 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

N аммония. В верхнем течении Селенги (пос. Наушки) максимальная концентрация N аммония (N-NH₄⁺) во внутригодовом распределении наблюдалась в весенний период и составляла 110–120 мкг N/л, в июне–июле уменьшалась до 20–50 мкг N/л, а в октябре возрастала до 40–60 мкг N/л. На рис. 2а приведено внутригодовое распределение средневзвешенных концентраций аммонийных солей. Среднегодовое содержание N аммония за 2002–2009 гг. оказалось

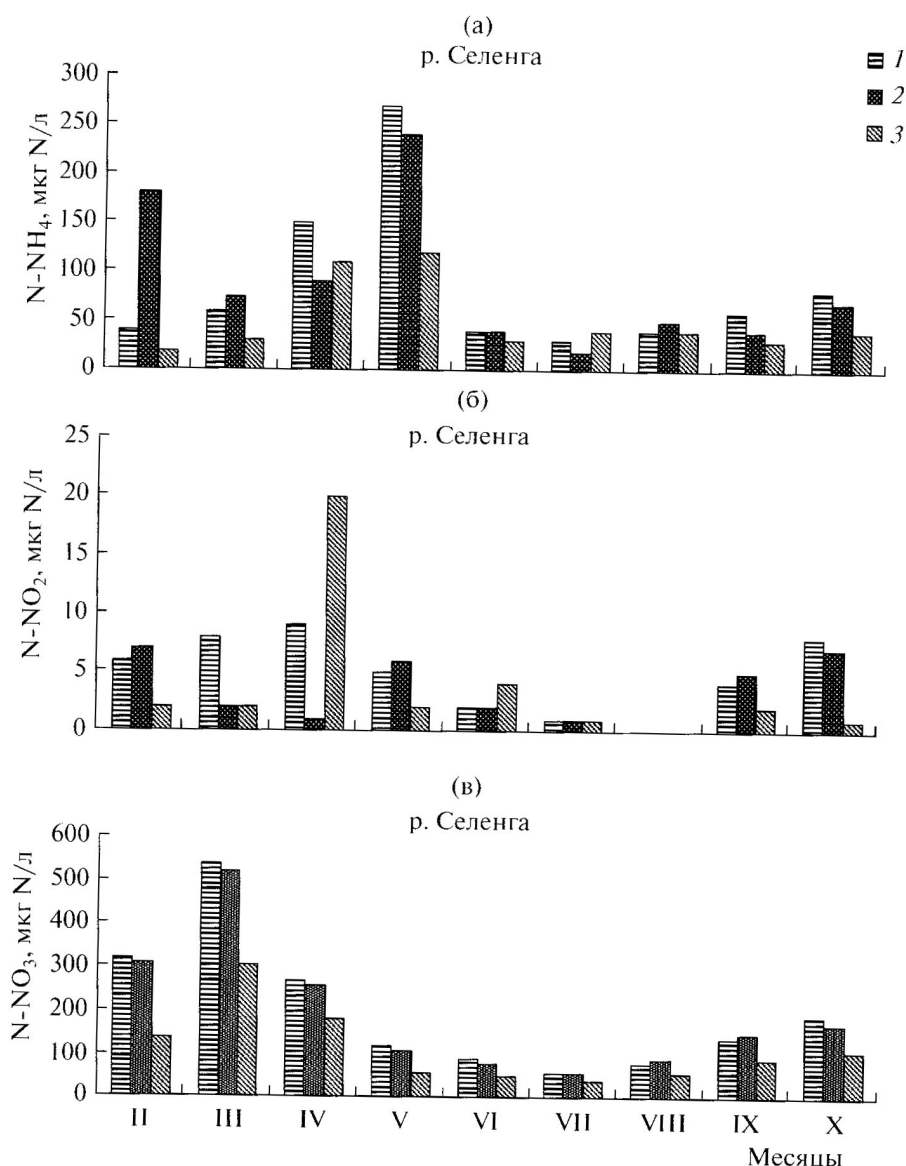


Рис. 2. Внутригодовой ход изменения средневзвешенных концентраций минеральных форм N в воде р. Селенги: аммонийного (а), нитритного (б) и нитратного (в): 1 – пос. Кабанск, 2 – рзд. Мостовой, 3 – пос. Наушки.

равным 56 мкг N/л при колебаниях по годам от 51 до 58 мкг N/л.

В среднем течении реки ниже г. Улан-Удэ у разъезда (рзд.) Мостового максимальная амплитуда колебаний концентраций рассматриваемой формы N увеличивается до 250–340 мкг N/л в подледный период и апреле–мае. В летний период его концентрация варьирует в интервале 60–80, в осенний – 80–120 мкг N/л. На этом участке реки выявляется дополнительный максимум – зимний, что обусловлено восстановительными условиями среды на этом участке реки вследствие сброса сточных вод г. Улан-Удэ. Максимумы концентраций отмечены в феврале, мае, октябре (рис. 2а). Среднее содержание N аммония в период наблюдений

было равно 96 мкг N/л при изменении среднегодовых концентраций от 92 до 104 мкг N/л.

В нижнем течении реки (пос. Кабанск) максимальная амплитуда колебаний содержания N аммония отмечена весной и составила 420 мкг N/л. В остальные периоды годового цикла эти амплитуды близки к таковым на створе рзд. Мостовой. Среднее содержание N аммония за 2002–2009 гг. оказалось равным 98 мкг N/л при колебаниях по годам в диапазоне от 89 до 104 мкг N/л (табл. 2).

Внутригодовая динамика концентрации N аммония в водах главных притоков аналогична таковой в р. Селенге. Воды р. Хилок отличаются наличием двух максимумов – зимнего (до 270 мкг N/л в 2004 г.) и весеннего. Зимний максимум обуслов-

лен, возможно, перемерзанием верховья реки. Динамика изменений концентраций этой формы N в воде р. Чикой отличается появлением дополнительного максимума в июле (до 150 мкг N/л в 2005, 2007 гг.), что обусловлено поступлением талых вод с окружающих высокогорных хребтов. Среднегодовое содержание N аммония в период наблюдений в реках Чикой и Хилок составляло 82 и 68 мкг N/л соответственно.

В водах рек Уда, Джиды и Темник содержание N аммония ниже, его максимальная концентрация не превышала 110–160 мкг N/л. В отдельные годы в летние месяцы содержание N аммония в водах этих рек снижалось до аналитического нуля. Среднегодовое содержание N аммония по наблюдениям 2002–2009 гг. в реках Уда, Джиды и Темник составило 68, 60 и 32 мкг N/л соответственно.

Режим изменчивости содержания N аммония имеет цикличность с максимумами в Селенге в мае, октябре; в главных притоках пики максимума наблюдались в феврале, мае, июле, октябре. В воде Селенги и притоков (рек Уда, Джиды, Темник) максимальные величины N аммония характерны для периода половодья из-за поступления с поверхностным стоком аллохтонного органического вещества. Появление дополнительного максимума в зимний период в среднем участке Селенги и Хилока обусловлено восстановительными условиями при снижении концентрации растворенного O_2 в воде.

N нитритов. В сезонной динамике концентраций N нитритов ($N-NO_2^-$) четко выраженной закономерности не выявлено. Тем не менее, в воде р. Селенги максимумы его содержания отмечены весной (апрель) и осенью (октябрь). Повышенные концентрации $N-NO_2^-$ наблюдаются в апреле вследствие окисления N аммония до N нитритов – токсичных, неустойчивых форм N. В это время в верхнем течении Селенги содержание N нитритов колебалось в пределах 14–22 мкг N/л, в 2004, 2005, 2007 гг. оно превышало предельно допустимые концентрации для рыбохозяйственных водоемов (ПДК_{р.в.}) в 1.5–1.8 раза и составляло 35–37 мкг N/л; в июне–августе – падает до аналитического нуля (рис. 26). Октябрь характеризовался небольшим повышением содержания нитритов (до 5–6 мкг N/л). Среднегодовое содержание N нитритов на этом участке Селенги составило 4.0 мкг N/л при вариации среднегодовых значений от 2.5 до 5.2 мкг N/л.

В среднем течении Селенги ниже г. Улан-Удэ максимальные амплитуды колебаний содержания нитритов в апреле – 10–14 мкг N/л, в 2003, 2005 гг. отмечалась концентрация 18–20 мкг N/л. В мае–июне нитрит присутствовал в количестве 5–8 мкг N/л, в начале июля его содержание

уменьшалось до 2–4 мкг N/л. Среднее содержание N нитритов равно 4 мкг N/л при изменении среднегодовой концентрации от 2 до 6 мкг N/л.

В нижнем течении (пос. Кабанск) максимальная концентрация N нитритов составляла 16–18 мкг N/л. В июне–августе N нитритов присутствовал в количестве 3–6 мкг N/л, в конце августа его содержание не превышает 0–3 мкг N/л, а в октябре увеличивается до 8–10 мкг N/л. Среднегодовое содержание N нитритов на этом участке Селенги составило 5 мкг N/л при вариации среднегодовых значений от 3.5 до 6.0 мкг N/л.

Внутригодовая динамика распределения N нитритов в воде главных притоков аналогична таковой в р. Селенге. Вода рек Чикой, Уда отличается относительно высокой амплитудой колебания содержания N нитритов (до 12–14 мкг N/л в марте), что вызвано большим загрязнением этих водотоков по сравнению с другими притоками. В воде рек Хилок, Джиды, Темник максимальная амплитуда колебаний среднемесячных концентраций не превышала 2–9 мкг N/л. В остальные периоды годового цикла динамика колебаний концентрации N нитритов близка к таковой в водах других главных притоков. В конце мая и в августе содержание N нитритов в воде притоков – на уровне аналитического нуля.

Среди притоков максимальная концентрация N нитритов отмечается в р. Уда, подверженной в наибольшей степени органическому загрязнению. Благодаря развитию фитопланктона в теплый период года потребление минеральных форм N существенно возрастает, и содержание N нитритов (промежуточной формы окисления соединений N) снижается до следовых количеств. Концентрация нитритов в водах рек превышает ПДК_{р.в.} (0.02 мг N/л) приблизительно в 20% проанализированных проб.

N Нитратов ($N-NO_3^-$) – доминирующая из минеральных форм N по временному распределению азотистых соединений в водах рек бассейна Селенги. Для внутригодовой изменчивости N нитратов характерно наличие двух максимумов: в феврале–марте и в сентябре–октябре. Эти максимумы связаны с уменьшенным потреблением фитопланктоном минеральных веществ и накоплением ОВ. Минимумы N нитратов приходятся на июль–август вследствие интенсивного их потребления (в основном минеральных форм) в процессе фотосинтеза.

По сравнению с главными притоками вода Селенги характеризуется повышенным содержанием N нитратов. На рис. 2 введено внутригодовое распределение средневзвешенных концентраций N нитратов в воде р. Селенги. В зимний период наибольшее содержание N нитратов на разных участках по течению реки существенно

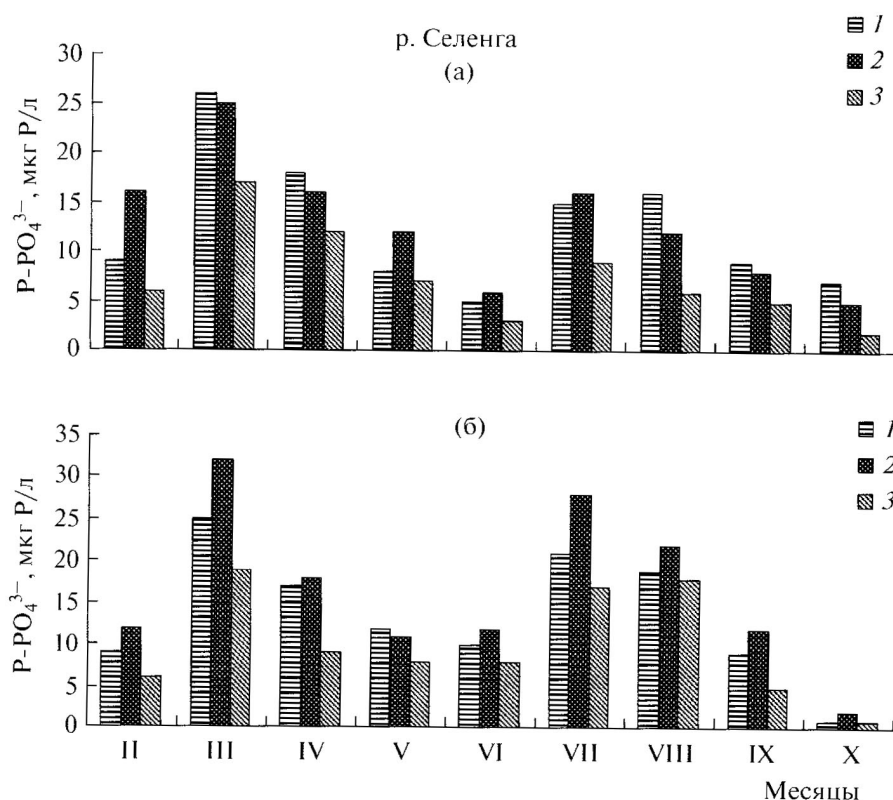


Рис. 3. Годовой ход изменения средневзвешенных концентраций фосфатов в воде р. Селенги у пос. Кабанск (1), рзд. Мостовой (2), пос. Наушки (3) — а и притоков Чикой (1), Хилок (2), Уда (3) — б.

различается: в верхнем течении (пос. Наушки) — 280–360, в среднем течении (рзд. Мостовой) — 480–530, а в нижнем течении (пос. Кабанск) — 540–640 мкг N/л.

В период открытого русла реки содержание N нитратов в среднем и нижнем течении выравнивается. В мае–июне его содержание варьирует в интервале 80–160, в июле 50–90 мкг N/л. В октябре нитрат присутствовал в количестве 140–170 мкг N/л.

Среднемноголетнее содержание N нитратов в селенгинской воде в нижнем течении было равно 298 мкг N/л при изменении среднегодовых концентраций от 286 до 304 мкг N/л.

Временная изменчивость режима N нитратов в водах главных притоков аналогична таковой в р. Селенге. За период исследования максимальная амплитуда изменения концентраций N нитратов в воде р. Чикой составляла 450–510, р. Хилок — 470–511, р. Уда — 350–370, р. Джиды — 340–390, р. Темник — 280–360 мкг N/л в течение периода. В период открытой воды отмечалось постепенное снижение содержания нитрата до 20–40 мкг N/л, а осенью — повышение до 100–150 мкг N/л (рис. 3в). Среднемноголетнее содержание N нитратов в воде рек Чикой, Хилок составляло 298 мкг N/л.

224 мкг N/л соответственно, в реках Джиды, Уда и Темник — 145–176 мкг N/л.

Общий N. Биогенные элементы, активно участвуя в биопродукционных процессах, определяют интенсивность развития фито-бактериопланктона. Эти процессы определяются не только имеющимися легко доступными для биоты минеральными формами N и P, но и органическими соединениями, которые при своей биохимической трансформации способны обеспечивать окружающую среду легко усваиваемыми планктоном формами БВ. Очевидно, не все количество связанных в живом и “косном” органическом материале N и P может быть выделено в окружающую среду в минеральной форме при биохимических деструкционных процессах. Об этом свидетельствует присутствие в водных экосистемах гумусовой компоненты, которая очень трудно поддается бактериальному воздействию и сохраняет в своем составе значительные количества N и P.

Содержание общего N ($N_{\text{общ}}$) различно в водах рек бассейна Селенги. В воде Селенги его максимальное внутригодовое количество меняется по течению реки: у пос. Наушки — 562, в среднем течении (рзд. Мостовой) — 970, в нижнем течении (пос. Кабанск) — 991 мкг N/л. В воде рек Чикой,

Хилок, Уда максимальное содержание $N_{\text{общ}}$ составляло 766, 689 и 642 мкг N/л, в водах рек Джиды и Темник — 654 и 471 мкг N/л соответственно.

Биогенный состав компонентов речных вод сложен и характеризуется разнообразием в содержании отдельных БВ и их форм — растворенных и взвешенных, органических и минеральных. Они активно вовлекаются в оборот гидробионтами и при развитии физико-химических, химических и биохимических процессов способны переходить из одной формы в другую. Существенно поступление органических и взвешенных соединений биогенных элементов в речные воды за счет отмирания и распада клеток гидробионтов, их прижизненных выделений, с промышленными, сельскохозяйственными, хозяйственно-бытовыми сточными водами, при обмене БВ на границе вода—дно.

Для концентрации ОВ характерна существенная сезонная изменчивость. Внутригодовой ход содержания органического азота $N_{\text{орг}}$ отличается максимум в вегетационный сезон. Наибольшее содержание $N_{\text{орг}}$ (до 198 мкг N/л) отмечалось в среднем течении р. Селенги. В воде притоков максимальное содержание $N_{\text{орг}}$ не превышало 142 мкг N/л. Среднегодовая доля $N_{\text{орг}}$ в $N_{\text{общ}}$ в стоке рек колеблется от 0.17 до 0.19. Она наибольшая в стоке рек Селенги и Джиды (0.18–0.2) и меньше — в стоке Чикоя, Хилока и Уды (0.17).

Фосфаты. Поведение P в водах более сложное, чем нитратов. Нагрузка речного стока по P в несколько раз превосходит природную из-за промышленных и сельскохозяйственных стоков и попадающих в реки детергентов, содержащих полифосфаты. В водотоках существуют своеобразные небиологические буферные механизмы, способные снижать высокую концентрацию P фосфатов ($P-PO_4^{3-}$) и увеличивать низкую до среднего уровня. Этот механизм представлен в виде процессов сорбции и десорбции фосфата на взвеси. При определенных кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условиях создаются такие зоны, в которых фосфат удаляется из воды, а в донных отложениях повышается его концентрация за счет десорбции из взвеси.

Воды р. Хилок отличаются наибольшей внутригодовой амплитудой содержания фосфатов (44 мкг P/л) (рис. 3), в Селенге эта величина не превышает 20–29 мкг P/л (рис. 3). Вода р. Джиды характеризуется повышенной концентрацией фосфата (29 мкг P/л).

Внутригодовой режим изменчивости фосфатов в воде рек бассейна различается. Так, в Селенге максимальная концентрация фосфатов отмечается в феврале–марте, тогда как в притоках в некоторые годы экстремальные концентрации фиксировались в июле, что вызвано поступлением талых вод с горных хребтов. Максимальное со-

держание фосфатов в воде рек на порядок ниже ПДК_{р.в.} (0.200 мг P/л).

Общий фосфор. Динамика режима общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) отличается ярко выраженным увеличением его содержания в период весеннего половодья в основном за счет органических форм; в это время в водах Селенги максимальная амплитуда внутригодового колебания содержания $P_{\text{общ}}$ составляла 104–142 мкг P/л. В остальные периоды годового цикла его содержание составляло 26–74 мкг P/л. Среднегодовое содержание этого показателя в нижнем течении реки составило 59 мкг P/л при колебании среднегодовой концентрации в интервале 52–68 мкг P/л.

По содержанию $P_{\text{общ}}$ главные притоки различаются. Первую группу — с наибольшей амплитудой его максимального содержания — составляет вода рек Хилок и Уда, в которых величина этого показателя в отдельные годы (2003, 2005 и 2008 гг.) составляла 152 и 70 мкг P/л соответственно, хотя среднегодовое его содержание в водах этих рек — 37 и 32 мкг P/л соответственно (табл. 2). Вторую группу составляют воды рек Чикой, Джиды, Темник, в которых максимальная амплитуда концентрации $P_{\text{общ}}$ во внутригодовом режиме варьировала в пределах 30–48 мкг P/л со среднегодовой концентрацией 18–28 мкг P/л.

Кремний (Si). Максимальная концентрация Si, наблюдаемая в марте, как и у соединений N, связана с зимним накоплением БВ. Весной содержание Si резко падает в связи с бурным развитием диатомовых водорослей — одного из основных видов фитопланктона.

В верхнем течении Селенги в марте наибольшая концентрация Si изменялась в интервале 4.2–4.9 мг Si/л, в отдельные годы (например, в 2007 г.) содержание Si возрастало до 6.7 мг Si/л. В апреле–мае концентрация Si в воде снижается до 2.8–3.7 мг Si/л, а осенью (в конце октября) увеличивается до 4.4–4.7 мг Si/л.

В среднем и нижнем течении Селенги внутригодовая динамика и амплитуда колебания концентрации Si в воде аналогичны. Эти участки реки отличаются тем, что максимальная амплитуда колебания содержания Si повышается до 7.8–8.2 мг Si/л.

Среднее содержание Si в воде Селенги в 2002–2009 гг. составляло 4.3 мг Si/л при изменении среднегодовой концентрации от 3.5 до 4.8 мг Si/л. Наименьшая концентрация отмечается в период открытой воды и совпадает с таковой во время наиболее интенсивного развития фитопланктона, наибольшая концентрация — зимой, когда регенерация Si преобладает над его потреблением. Растворенная кремнекислота находилась в количествах, чаще всего превышающих потребность растительных организмов.

Содержание Si в водах правых притоков (Чикой, Хилок, Уда) характеризуется следующей внутригодовой динамикой: в марте его количество в реках Чикой и Хилок изменялось в пределах 5.1–5.9, Уда – 7.1–7.6 мг Si/л; в период летней межени – от 3.8 до 5.0 мг Si/л, а осенью его содержание возрастает до 4.8–5.4 мг Si/л.

В водах рек Джиды и Темника максимальная амплитуда изменения содержания Si в воде в зимний период не превышала 7.0 мг Si/л. Более того, в отдельные годы (например, 2004, 2007 гг.) содержание Si в воде р. Джиды варьировало в интервале 2.5–3.6 мг Si/л. В весенне-летний период концентрация Si в воде рек Джиды и Темника изменялась в пределах 3.0–4.7 мг Si/л, а осенью она возрастала до 5.1–5.5 мг Si/л.

Среднее содержание Si в воде рек Чикой, Хилок, Джиды и Темника за 2002–2009 гг. составляло 3.8–4.6 мг Si/л при изменении среднегодовой концентрации от 3.4 до 4.8 мг Si/л, причем наибольшее среднегодовое содержание Si (5.2 мг Si/л) характерно для вод р. Уда.

СООТНОШЕНИЕ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В СТОКЕ ОТДЕЛЬНЫХ РЕК

Различия природных и антропогенных факторов и водного питания в бассейнах рек отражаются не только на концентрациях отдельных БВ, но и на их соотношениях, так как в их составе меняются доли взвешенных и минеральных компонентов.

Соотношение минеральных фракций Si, N и P свидетельствует о большом различии запасов БВ в стоке рек. В стоках рек Хилок, Уда, Джиды и Темника отношение $N_{\text{мин}}/PO_4^{3-}$ примерно одного порядка и его среднегодовые значения варьируют в интервале 20.1–25.2, в стоках рек Селенги и Чикой оно возрастает соответственно до 34.3 и 30.2, что объясняется в целом низкими концентрациями минерального P в воде этих рек (табл. 2). Минимальные значения $N_{\text{мин}}/PO_4^{3-}$ в реках Селенги и Чикой составляют 7–9 и отмечаются в июле–августе, а в небольших по стоку реках Хилок, Джиды, Уда и Темника минимальные значения отмечаются в августе.

Соотношение минеральных форм N и P позволяет судить о том, какой из биогенных элементов служит потенциальным лимитантом процессов первичного продуцирования ОВ в водной среде: при $N_{\text{мин}}/PO_4^{3-} < \text{лимитант N}$, при $N_{\text{мин}}/PO_4^{3-} > 7$ – P, а при $N_{\text{мин}}/PO_4^{3-} \sim 7$ оба элемента могут быть лимитантами [20]. Значения указанного соотношения в водах Селенги всегда > 7 . Таким образом, в воде р. Селенги основной лимитант процессов биопродуцирования – P.

Среднегодовое значение $Si/N_{\text{мин}}$ в воде Селенги – наименьшее (10.3), в воде рек Чикой, Хилок, Джиды и Темника оно примерно одного порядка (15.3–18.1), в стоках Уды оно несколько выше (26.4). Среднегодовые отношения Si/PO_4^{3-} в стоках рек Селенги, Хилок и Джиды варьируют в близком диапазоне (354–388), в стоке рек Чикой и Темника диапазон варьирования больше (471–475), в стоке р. Уда это отношение значительно больше 650.

Среднегодовое отношение $PO_4^{3-}/P_{\text{общ}}$ в стоках притоков составляет 0.20–0.38, в стоке Селенги – 0.22. Согласно литературным данным [15], в водах рек, расположенных на лесных, смешанных, сельскохозяйственных и урбанизированных водосборах, $PO_4^{3-}/P_{\text{общ}}$ в среднем составляет 0.3–0.6 и возрастает до 0.9 при увеличении плотности населения до 100–200 чел/км².

Отношение $N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}}$ наименьшее в стоке рек Уда и Селенги (7.4–7.8), наибольшее – в стоке р. Чикой (12.4). В стоках рек Хилок, Джиды и Темника в среднем за год оно составляет 9.2–11.6.

ВЫНОС РЕКАМИ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

Период исследований 2002–2009 гг. характеризовался условиями низкой водности в бассейне Селенги. Так, водный сток Селенги у пос. Кабанск изменялся в пределах 15.6–23.7, сток р. Чикой – 4.4–7.9, р. Хилок – 1.4–2.79, р. Уда – 1.2–2.6, р. Джиды – 2.5–3.4, р. Темника – 0.776–1.32 км³. В течение года биогенный сток неравномерен и соответствует внутригодовому распределению водного стока рек. На рис. 4а, 4б представлены гидрографы р. Селенги в верхнем и нижнем течении и по одному из правых и левых притоков. В феврале–мае с речным стоком в дельту поступает 19.3% годового выноса фосфатов, немногим более (25.3%) – $P_{\text{общ}}$. Наибольшее поступление общего количества фосфорных соединений приходится на май–октябрь (до 61.2 %). В мае–октябре доля выносимых в дельту фосфатов составляет 78.3%.

Поступление в дельту с водами р. Селенги различных форм N обнаруживает существенную внутригодовую дисперсию. На февраль–июнь приходится 76 и 38.5%, на август–октябрь – 16.2 и 43.1% годового выноса NH_4^+ и NO_3^- соответственно. Вынос соединений Si с водами Селенги особенно значим в мае–июле (52%) и сентябре–октябре (24%).

Динамика внутригодового поступления БВ в Селенгу со стоком притоков (реки Чикой, Хилок, Уда, Джиды и Темника) также соответствует распределению в течение года водного стока. В феврале–июне в Селенгу поступает 21 и 48% годового вы-

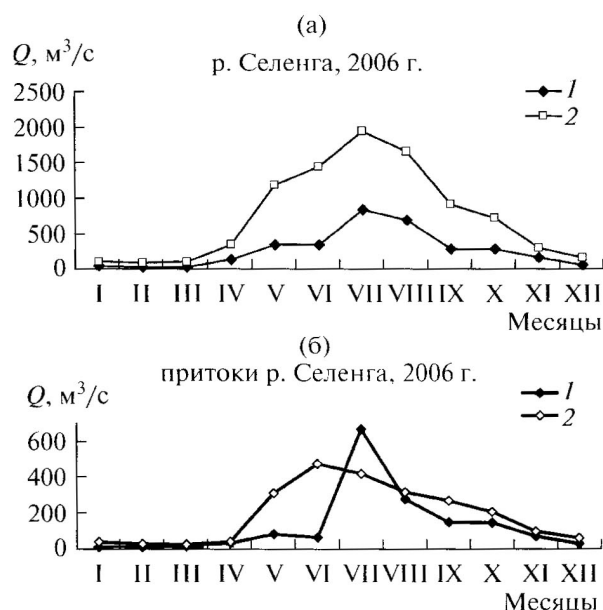


Рис. 4. Гидрографы р. Селенги в верхнем (1) и нижнем (2) течении (а), правого притока р. Чикой (1) и левого – р. Джиды (2) (б) в 2006 г.

носа фосфатов и общих соединений фосфора соответственно. Вынос NO_3^- в Селенгу происходит преимущественно в мае–октябре (53.7%).

По результатам расчетов были также оценены соотношения выносимых со стоком отдельных рек БВ (табл. 3). Доля NH_4^+ в $\text{N}_{\text{мин}}$ в стоке всех рек бассейна изменялась в интервале 28–48%, в стоке Селенги она составила 36%. Доля NO_2^- в $\text{N}_{\text{мин}}$ в стоке рек невелика и в среднем для всех рек ва-

рьирует в пределах 0.6–1.1%. Доля NO_3^- в $\text{N}_{\text{мин}}$ наибольшая – в стоке всех рек бассейна и варьирует в пределах 52–72%. Доля $\text{N}_{\text{мин}}$ в $\text{N}_{\text{общ}}$ составляет 76–86%, а в среднем для речного стока бассейна она оценена равной 82%.

Биогенный сток рек бассейна Селенги отличается не только количеством выносимых в дельту БВ, но и их соотношением. Соотношения выносимых стоком минеральных компонентов $\text{Si} : \text{N}_{\text{мин}} : \text{PO}_4^{3-}$ составляют 326 : 31 : 1, 666 : 34 : 1, 285 : 16 : 1, 610 : 20 : 1, 380 : 25 : 1, 287 : 15 : 1 соответственно для рек Селенга, Чикой, Хилок, Уда, Джиды и Темник. Соотношения $\text{Si} : \text{N}_{\text{общ}} : \text{P}_{\text{общ}}$ в стоке р. Селенги составляет 76 : 9 : 1, р. Чикой – 200 : 15 : 1, р. Хилок – 114 : 6.8 : 1, р. Уда – 203 : 10 : 1, р. Джиды – 152 : 13 : 1, р. Темник – 115 : 66 : 1.

ВЫВОДЫ

Водосборы рек бассейна Селенги различаются почвенно-геологическими условиями, хозяйственной освоенностью и природопользованием. Эти факторы вместе с режимом питания рек и межгодовой изменчивостью климата формируют водный и химический сток, качество и санитарное состояние водных ресурсов.

Содержание БВ в реках служит комплексной характеристикой биогеохимических процессов в природных водах, показателем развития естественной трансформации вещества и антропогенного воздействия на окружающую среду обитания.

Выявлена внутригодовая изменчивость концентраций БВ в реках бассейна Селенги, а также установлены качественные различия рек по содержанию в них органических и минеральных

Таблица 3. Годовые поступления БВ с речным стоком, тыс. т N, P, Si, бассейна Селенги в 2002–2009 гг.

Вещество	Реки					
	Селенга	Чикой	Хилок	Уда	Джиды	Темник
N-NH_4^+	1.3–2.6	0.31–0.65	0.10–0.24	0.08–0.12	0.21–0.33	0.03–0.06
N-NO_2^-	0.07–0.11	0.008–0.01	0.003–0.005	0.002–0.005	0.004–0.007	0.001–0.002
N-NO_3^-	2.8–4.8	0.63–0.87	0.20–0.34	0.16–0.20	0.26–0.35	0.15–0.22
$\text{N}_{\text{мин}}$	4.3–7.2	1.0–1.4	0.31–0.58	0.22–0.33	0.49–0.68	0.17–0.26
$\text{N}_{\text{общ}}$	5.2–8.7	1.1–1.7	0.4–0.7	0.26–0.40	0.60–0.83	0.20–0.32
$\text{N}_{\text{орг}}$	1.1–1.6	0.18–0.32	0.07–0.13	0.03–0.07	0.11–0.15	0.03–0.06
P-PO_4^{3-}	0.12–0.18	0.04–0.08	0.014–0.03	0.011–0.015	0.032–0.067	0.008–0.02
$\text{P}_{\text{общ}}$	0.58–0.70	0.17–0.33	0.06–0.13	0.047–0.064	0.12–0.19	0.024–0.056
Si	656.0–99.0	17.6–30.2	5.3–10.4	6.1–8.0	8.9–13.3	2.3–4.3

компонентов. Реки различаются по среднегодовым и среднемесячным соотношениям растворенных органических и минеральных форм БВ. Наибольшее среднегодовое отношение $N_{\text{мин}}/\text{PO}_4^{3-}$ отмечено в водах р. Селенги (34,2), оно почти в 1,5 раза больше, чем в водах рек Хилок и Уда (19,5–20,2). В течение года отношение $N_{\text{мин}}/\text{PO}_4^{3-}$ в реках довольно изменчиво. Наименьшие его значения (7–9) отмечаются в р. Селенге в июле–августе, а в меньших по стоку притоках – позже, в конце августа.

Речные воды бассейна Селенги обладают разным потенциалом влияния на развитие продукционных процессов. При $N_{\text{мин}}/\text{PO}_4^{3-} < 7$ эти процессы лимитируются Р, при $N_{\text{мин}}/\text{PO}_4^{3-} > 7$ – N, а при $N_{\text{мин}}/\text{PO}_4^{3-} \sim 7$ оба эти элемента могут лимитировать развитие фитопланктона. В водах р. Селенги большую часть года $N_{\text{мин}}/\text{PO}_4^{3-} > 7$, поэтому основной лимитант процессов биопродуцирования – Р.

Поступление в дельту с водами р. Селенги различных форм N обнаруживает существенную внутригодовую дисперсию. На февраль–июнь приходится 76 и 38,5%, август–октябрь – 16,2 и 43,1% годового выноса NH_4^+ и NO_3^- соответственно. Вынос соединений Si водами Селенги особенно значим в мае–июле (52%) и сентябре–октябре (24%).

Доля NH_4^+ в $N_{\text{мин}}$ в стоке всех рек бассейна изменялась в интервале 28–48%, в стоке Селенги она составила 36%. Доля NO_2^- в $N_{\text{мин}}$ в стоке рек невелика и в среднем для всех рек варьирует в пределах 0,6–1,1%. Доля NO_3^- в $N_{\text{мин}}$ – наибольшая в стоке всех рек бассейна и варьирует в пределах 52–72%. Доля $N_{\text{мин}}$ в $N_{\text{общ}}$ – 76–86%, а в среднем для речного стока бассейна – 82%.

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам гидрохимической лаборатории Геологического института СО РАН за выполненные аналитические работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алевкин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 444 с.
2. Алевкин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 270 с.
3. Богданов В.Т. Химический сток р. Селенги в многоводный и маловодный годы // Тез. VIII совещ. по подземным водам. Иркутск, Улан-Удэ, 1976. С. 82.
4. Бочкарев Н.Ф. Гидрохимия реки Селенги // Тр. Иркутского гос. ун-та. 1958. Т. XXIУ. С. 143–148.
5. Вотинцев К.К., Глазунов И.В., Толмачева А.П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал. М.: Наука, 1965. 494 с.
6. Гордеев В.В., Джамалов Р.Г., Зекцер И.С. и др. Оценка выноса биогенных элементов с речным и подземным стоком в окраинные моря Российской Арктики // Вод. ресурсы. 1999. Т. 26. № 2. С. 206–211.
7. Государственный контроль качества воды. М.: Изд-во стандартов, 2003. 776 с.
8. Ежегодник качества поверхностных вод Российской Федерации. Обнинск, 1993–1999.
9. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
10. Молотов В.С., Коломеец О.П. Мониторинг вод основного притока оз. Байкал – реки Селенги // Селенга – река без границ. Улан-Удэ, 2002. С. 29–31.
11. Обожен В.Н., Богданов В.Т., Кликунова О.Ф. Гидрохимия рек и озер Бурятии. Новосибирск: Наука, 1984. 152 с.
12. Питьева К.Е., Брусилковский С.А., Востриков Л.Ю., Чесалов С.М. Практикум по гидрохимии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 150 с.
13. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1973. Т. 16. Вып. 3. 400 с.
14. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 537 с.
15. Савенко В.С., Захарова Е.А. Фосфор в основной гидрографической сети // Вод. ресурсы. 1997. Т. 24. № 3. С. 292–299.
16. Сорокикова Л.М., Поповская Г.И., Томберг И.В., Башенхаева Н.В. Пространственно-временная изменчивость содержания биогенных и органических веществ и фитопланктона в воде р. Селенги и протоках ее дельты // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. № 4. С. 465–474.
17. Сорокикова Л.М., Синюкович В.Н., Дрюккер В.В. и др. Экологические особенности реки Селенги в условиях наводнения // География и природные ресурсы. 1995. № 1. С. 64–71.
18. Сорокикова Л.М., Синюкович В.Н., Ходжер Т.В. и др. Поступление биогенных элементов и органических веществ в оз. Байкал с речными водами и атмосферными осадками // Метеорология и гидрология. 2001. № 4. С. 78–86.
19. Сорокикова Л.М., Тулохонов А.К., Синюкович В.Н. и др. Качество вод в дельте реки Селенги // География и природные ресурсы. 2005. № 1. С. 73–80.
20. Строганов Н.С., Бузинова Н.С. Практическое руководство по гидрохимии. М.: Изд-во МГУ, 1980. 193 с.
21. Meybeck M. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by World rivers // Am. J. Sci. 1982. V. 282. P. 401–450.