

УДК [556.541+574.583:581.543.5](282.256.341.5)

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ  
БИОГЕННЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И ФИТОПЛАНКТОНА  
В ВОДЕ Р. СЕЛЕНГИ И ПРОТОКАХ ЕЕ ДЕЛЬТЫ<sup>1</sup>**

© 2009 г. Л. М. Сорокикова, Г. И. Поповская, И. В. Томберг, Н. В. Башенхаева

*Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук*

664033 Иркутск, а/я 4199

Поступила в редакцию 16.10.2007 г.

Установлены особенности динамики концентраций биогенных веществ, органического С и фитопланктона в нижнем течении р. Селенги и протоках дельты. Показаны количественные и качественные изменения исследованных компонентов в условиях экстремально низкой водности. Выявлена высокая корреляционная связь между изменением концентраций нитратного N, минерального Р и биомассой фитопланктона.

Дельты рек представляют собой переходную область между двумя граничащими экосистемами – рекой и озером или морем. Это особое природное образование, где органический и биогенный сток трансформируется качественно и количественно вследствие интенсивного биотического круговорота. Очищающая роль дельты максимальна в период открытой воды и минимальна зимой, так как важными аккумуляторами и трансформаторами химических веществ являются погруженная водная растительность, фитопланктон и фитобентос [6].

Дельта р. Селенги занимает обширную территорию и в разных источниках оценивается от 546 до 5000 км<sup>2</sup> [1, 14]. В данной работе за начало дельты принято место разделения реки на два наиболее крупных рукава в 34 км от устья. Основные протоки дельты можно разделить на три группы – южную, среднюю и северную. Северную группу представляют протоки Лобановская, Дологан и Северная, среднюю – Голутай, Колпинная и Средняя, южную – Левобережная, Шаманка и Харауз. Наиболее крупные из них – Левобережная, Харауз и Лобановская, по которым проходит до 80% водного стока в весенне-осенний период и 99% зимой. Зимой мелкие протоки (Голутай, Колпинная, Средняя, Северная) чаще всего перемерзают в верхнем течении [16]. Помимо перечисленных, дельта включает в себя множество других протоков, озер, стариц, создающих сложную гидрографическую систему (рис. 1).

Выполненные ранее исследования химического состава воды [2, 8, 18, 19, 21], численности и биомассы фитопланктона [11–13, 25] показали, что динамика изучаемых компонентов и видовое разнообразие фитопланктона в воде р. Селенги определяется как

природными, так и антропогенными факторами. В многолетнем аспекте отмечены количественные и качественные изменения в составе фитопланктона [12, 25], связанные с увеличением антропогенной нагрузки на экосистему реки и повышением в воде концентраций биогенных веществ (БВ) [8, 19]. Так, средневзвешенная концентрация минерального Р в воде р. Селенги в 1950-е гг. не превышала 13, а в 1990-е гг. составила 21 мкг Р/л. Средняя численность фитопланктона за этот период увеличилась с 0.8–1.4 до 5–28 млн.кл/л. В его составе возросло, главным образом, количество мелкоклеточных диатомовых водорослей, при этом доминирующее положение заняли водоросли из рода *Stephanodiscus*. В литературе в основном приводятся данные, характеризующие химический состав и динамику фитопланктона в воде р. Селенги и ее главной протоки Харауз и крайне ограниченные сведения по их изменению в мелких протоках, что послужило основанием для организации многолетних комплексных исследований в дельте реки.

В задачу исследований входило изучение сезонной и межгодовой изменчивости концентраций БВ, органических веществ (ОВ) и фитопланктона в нижнем течении р. Селенги и протоках ее дельты для определения количественных и качественных изменений исследуемых компонентов при прохождении водных масс по дельте.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Гидрохимические и гидробиологические исследования выполнены в 2001–2005 гг. Отбор проб воды проводился в различные гидрологические фазы (зимняя межень, весеннее половодье, летняя и осенняя межень) на постоянных створах: в нижнем течении р. Селенги и протоках дельты (рис.1).

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН (интеграционные проекты 90 и 99) и РФФИ (грант 05-05-97304 “Байкал”).



**Рис. 1.** Карта-схема отбора проб в дельте р. Селенги. 1 – Селенга, с. Кабанск; 2 – Селенга, с. Мурзино; 3 – протока Левобережная, устье; 4 – протока Шаманка, устье; 5, 6 – протока Харауз, середина, устье соответственно; 6 – протока Харауз, устье; 7, 8 – протока Голутай, середина, устье соответственно; 9 – протока Средняя, устье; 10 – протока Колпинная, устье; 11 – протока Северная, устье; 12 – протока Лобановская, устье.

Пробы на химический анализ фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм. Определение БВ проводилось колориметрическим методом, содержание ОВ – прямым определением органического С ( $C_{\text{орг}}$ ) [15, 20, 27]. Достоверность полученных результатов регулярно проверялась контролем качества анализов в рамках международной программы EANET по тестированию стандартных образцов поверхностных вод. Для количественного учета фитопланктона использовали осадочный метод. Подсчет численности проводили на разграфленном предметном стекле по методу Гензена в капле 0.1 мл в 2-кратной повторности. Биомассу определяли объемно-счетным методом [5].

**Биогенные вещества и  $C_{\text{орг}}$ .** Период исследований в основном характеризовался условиями низкой водности (23.2–26.4 км<sup>3</sup>), и только 2001 г. по обеспеченности был близок к среднемуголетним величинам (28.7 км<sup>3</sup>). Самая низкая водность была зарегистрирована в 2003 г., когда в июле расходы воды в р. Селенге снижались до исторического минимума (614 м<sup>3</sup>/с). Низкая обеспеченность стока в период наблюдений в значительной степени определила количественные и качественные изменения химического

состава селенгинских вод, динамику концентраций главных ионов и растворенного  $O_2$  [22, 23].

В период исследований в воде р. Селенги и проток дельты концентрации нитратного, аммонийного и нитритного N изменялись в пределах 0.1–0.63, 0.01–1.03 (рис. 2а, б) и 0–0.005 мг N/л соответственно. Внутригодовые изменения концентраций нитратного N в воде р. Селенги, крупных (Левобережная, Шаманка, Харауз, Лобановская) и малых (Колпинная, Средняя, Северная) проток различались незначительно (рис. 2а). Максимальные его концентрации наблюдались в зимний период, минимальные – в весенне-летний. Динамика концентраций аммонийного N в воде проток различалась. В воде р. Селенги и больших проток максимальные величины  $NH_4^+$  характерны только для периода половодья (за счет поступления с поверхностным стоком аллохтонного ОВ) а минимальные – для зимнего (сток с водосбора отсутствует).

В воде малых проток в отличие от крупных в динамике  $NH_4^+$  отмечено два максимума – зимний и весенний (рис. 2б). Высокое содержание  $NH_4^+$  зимой обусловлено восстановительными условиями

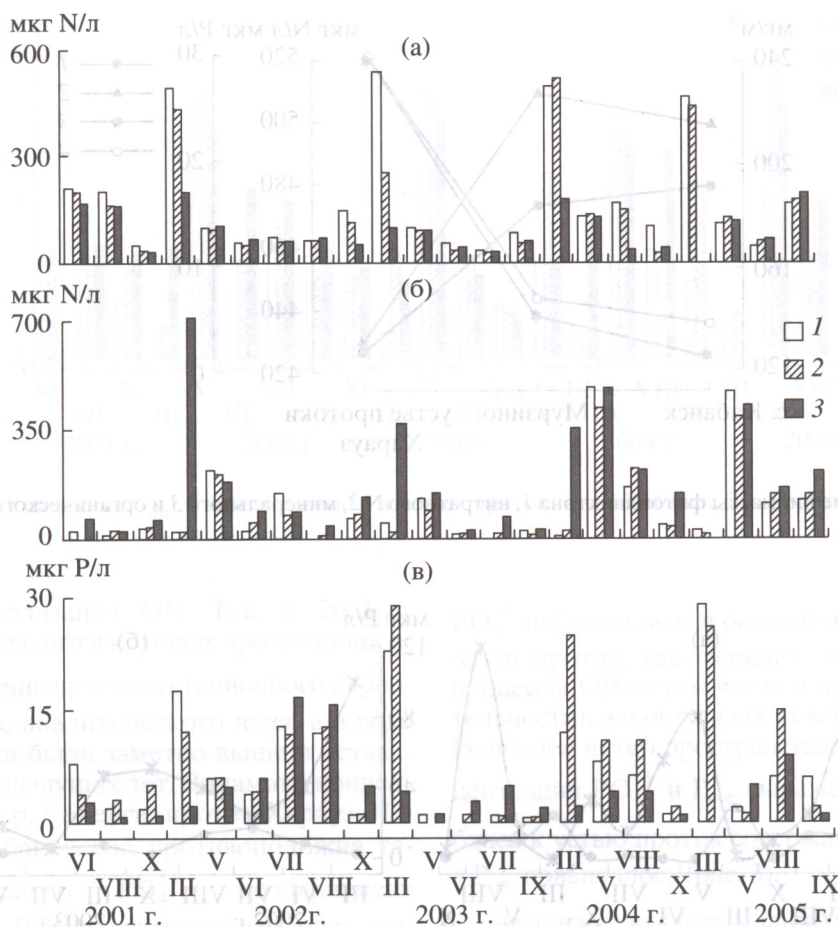


Рис. 2. Сезонные изменения концентраций нитратного (а), аммонийного (б) N и минерального P (в) в воде р. Селенги и устьях проток. 1 – с. Кабанск, 2, 3 – протоки Харауз, Средняя соответственно.

среды в устьях этих проток, когда при низкой концентрации растворенного  $O_2$  в воде (0.2–1.1 мг/л) и высоком содержании ОВ происходит его накопление [17]. Весенний максимум связан с поступлением его с паводковыми водами с водосбора. В зимний период в воде р. Селенги и крупных проток доля  $NH_4^+$  в сумме минерального N не превышала 5–15, в воде малых достигала 72–99%.

В распределении обеих форм N по длине проток определенной закономерности в период открытого русла не установлено. Например, от с. Мурзино вниз по течению по протокам Харауз и Шаманка снижение концентраций  $NO_3^-$  может быть в их средней части и незначительное увеличение к устью, а по протокам Галута и Колпинная – постепенное снижение к устью. Повышение концентраций  $NH_4^+$  чаще всего регистрировалось в средней части проток. Наиболее четко снижение концентраций  $NO_3^-$  по длине проток прослеживалось зимой, когда отсутствовал приток поверхностных вод с водосбора (рис. 3, таблица). При прохождении водных масс через дельту

(от с. Кабанск до устья проток) его концентрация в воде крупных проток снижалась на 0.08–0.49 мг N/л.

В динамике концентраций  $NO_2^-$  определенной закономерности не установлено. Эта форма N фиксировалась в местах с крайне низкой проточностью, заросших растительностью, или осенью при отмирании растений и разложении ОВ.

В межгодовом аспекте самые низкие концентрации минерального N отмечены в вегетационный период 2003 г., что связано с крайне низкой водностью и массовым развитием фитопланктона уже в мае. В период открытого русла во все годы повышению концентраций N в воде р. Селенги и проток способствовало прохождение паводков и поступление веществ с водосбора.

Концентрации минерального и органического P в воде исследованных водотоков изменялись в широких пределах (рис. 2в, 4). В воде р. Селенги и крупных проток накопление минерального P отмечено зимой, когда развитие фитопланктона и высшей водной растительности крайне низкое. Снижение концентраций происходило после прохождения па-

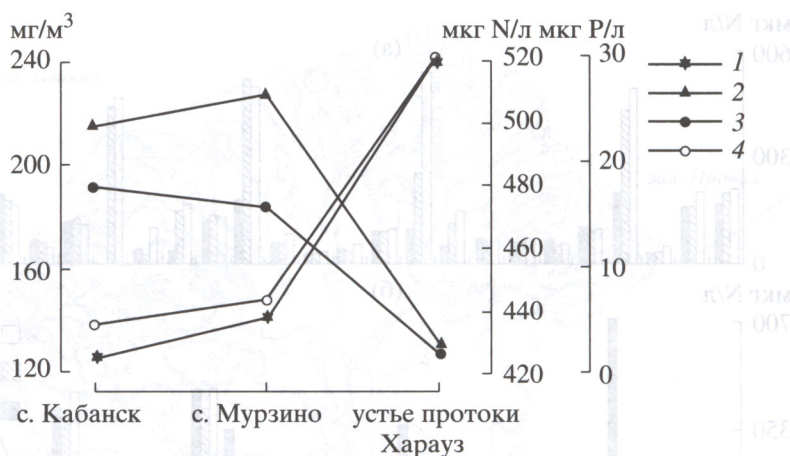


Рис. 3. Распределение биомассы фитопланктона 1, нитратного N 2, минерального 3 и органического 4 Р по длине реки зимой.

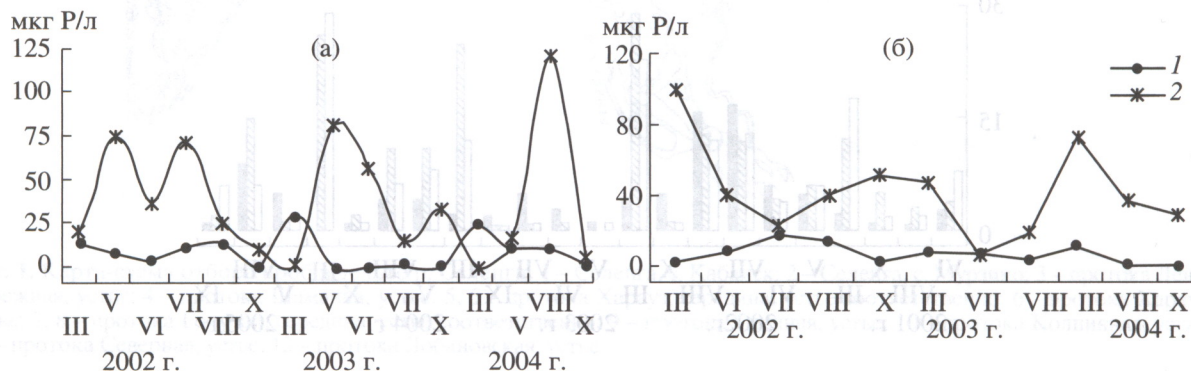


Рис. 4. Изменение концентраций минерального 1 и органического 2 Р в устье проток Харауз (а) и Колпинная (б).

водка, и в течение вегетационного периода они оставались на низком уровне (рис. 4а). В мелких протоках зимний максимум и летний минимум  $PO_4^{3-}$  не всегда хорошо выражены как в крупных (рис. 4б).

В этих протоках изменению динамики его концентраций способствовали такие факторы как замерзание в верхнем течении зимой, более низкий водообмен в весенне-осенний период и повышенные

Концентрация минерального N, C и фитопланктона в воде проток дельты р. Селенги зимой

| Место отбора проб    | Фитопланктон           |         |                             |         | C <sub>орг</sub> |         | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |         | N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> |         |
|----------------------|------------------------|---------|-----------------------------|---------|------------------|---------|--------------------------------|---------|--------------------------------|---------|
|                      | численность, тыс. кл/л |         | биомасса, мг/м <sup>3</sup> |         | мг/л             |         |                                |         |                                |         |
|                      | 2002 г.                | 2003 г. | 2002 г.                     | 2003 г. | 2002 г.          | 2003 г. | 2002 г.                        | 2003 г. | 2002 г.                        | 2003 г. |
| Селенга (с. Кабанск) | 111                    | 116     | 126                         | 226     | 1.24             | 1.20    | 0.5                            | 0.54    | 0.02                           | 0.05    |
| Селенга (с. Мурзино) | 165                    | 128     | 140                         | 179     | 1.24             | 1.20    | 0.51                           | 0.7     | 0.02                           | 0.03    |
| Устье проток         |                        |         |                             |         |                  |         |                                |         |                                |         |
| Харауз               | 276                    | 374     | 241                         | 463     | 1.58             | 1.69    | 0.43                           | 0.25    | 0.02                           | 0.02    |
| Лобановская          | 291                    | 150     | 840                         | 1044    | 2.03             | 1.80    | 0.4                            | 0.63    | 0.02                           | 0.03    |
| Колпинная            | 18591                  | 14277   | 1272                        | 1012    | 14.14            | 14.85   | 0.12                           | 0.05    | 1.03                           | 1.41    |
| Средняя              | 1796                   | 390     | 437                         | 516     | 5.14             | 3.56    | 0.2                            | 0.1     | 0.7                            | 0.37    |

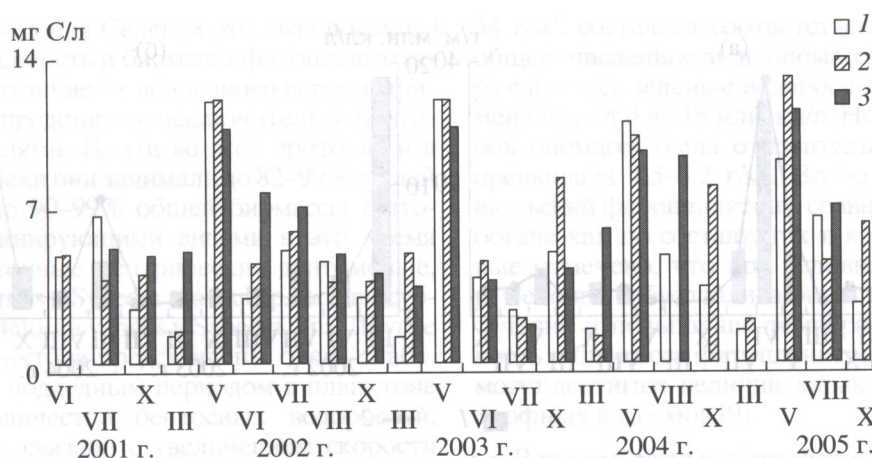


Рис. 5. Межгодовая динамика  $C_{орг}$  в воде р. Селенги и устьев проток. 1 – с. Кабанск, 2, 3 – протоки Харауз, Средняя соответственно.

скорости реминерализации ОВ. Так, в 2003 г. (рис. 4а) в воде р. Селенги и крупных проток концентрации  $PO_4^{3-}$  в течение всего вегетационного периода были на уровне аналитического нуля, а в воде мелких проток они были заметно выше и оставались на уровне предыдущих лет. Динамика концентраций  $P_{орг}$  в воде р. Селенги, проток Харауз, Левобережной и Лобановской противоположна таковой минерального  $PO_4^{3-}$ , коэффициент корреляции – 0.70. В этих водотоках наиболее низкие концентрации  $P_{орг}$  наблюдались зимой, максимальные – в период открытого русла и колебались в пределах 73–118 мкг Р/л (рис. 4а). В воде проток Колпинной, Северной и Средней во внутригодовой динамике концентраций  $P_{орг}$  минимальные величины отмечены в июле (рис. 4б), максимальные – зимой. Так, в устье протоки Колпинной концентрации  $P_{орг}$  зимой достигали 107 мкг Р/л.

В период открытой воды определенных закономерностей в пространственной динамике  $PO_4^{3-}$  и  $P_{орг}$  по протокам дельты не установлено. Можно отметить, что в мае – июне от с. Мурзино по протокам Харауз, Левобережной, Лобановской и Средней регистрировалось увеличение  $PO_4^{3-}$  в средней их части. При этом в воде протоки Колпинной по всей ее длине концентрации  $PO_4^{3-}$  практически не изменялись. На выходе из проток его концентрации в это время года в основном снижались, что, вероятно, связано с влиянием байкальских вод [3]. В июле–августе концентрации  $PO_4^{3-}$  в воде были низкими уже в районе с. Кабанск и далее по длине проток практически не изменялись. Определенных изменений концентраций  $P_{орг}$  по длине проток в это время не установлено. В октябре повышенные концентрации

$PO_4^{3-}$  наблюдались, в основном, в средней и нижней части проток, где активнее идут деструкционные процессы ОВ (в том числе и высшей водной растительности), накопленных за вегетационный период. Наиболее четко пространственные изменения концентраций  $PO_4^{3-}$  и  $P_{орг}$  выражены зимой. От с. Кабанск к устью проток содержание  $PO_4^{3-}$  снижалось, а  $P_{орг}$  повышалось (рис. 3).

Анализ межгодовых данных показал, что наиболее низкие концентрации  $PO_4^{3-}$  отмечены в 2003 г. В 2002, 2004 и 2005 гг. небольшое повышение водности в летний период способствовало увеличению его концентраций в селенгинской воде. Характер межгодовой динамики концентраций  $P_{орг}$  во все годы остается схожим для р. Селенги, крупных и малых проток.

На территории дельты, где скорости течения ниже, чем в реке, более заметную роль в динамике ОВ играют внутриводоемные процессы. Концентрации  $C_{орг}$  в воде исследованных водотоков изменялись от 1.2 до 14.1 мг/л. Анализ полученных результатов (рис. 5) показал, что максимальные концентрации  $C_{орг}$  в воде р. Селенги и проток отмечены во время половодья. Исключение составляла протока Колпинная, в устье которой его максимальные концентрации отмечены зимой, достигая  $\geq 14$  мг/л, в то же время в воде р. Селенги и крупных проток они были минимальными (таблица). По длине крупных проток от с. Кабанск к их устью увеличение концентраций  $C_{орг}$  отмечено зимой, что обусловлено, в основном, развитием фитопланктона (таблица). В летний период его содержание в значительной степени зависело от прохождения паводков и поступления ОВ с водосбора. Необходимо отметить, что в июле 2003 г. концентрации  $C_{орг}$  в воде, как и  $P_{орг}$ , резко снизились, что, вероятно, связано с понижением раз-

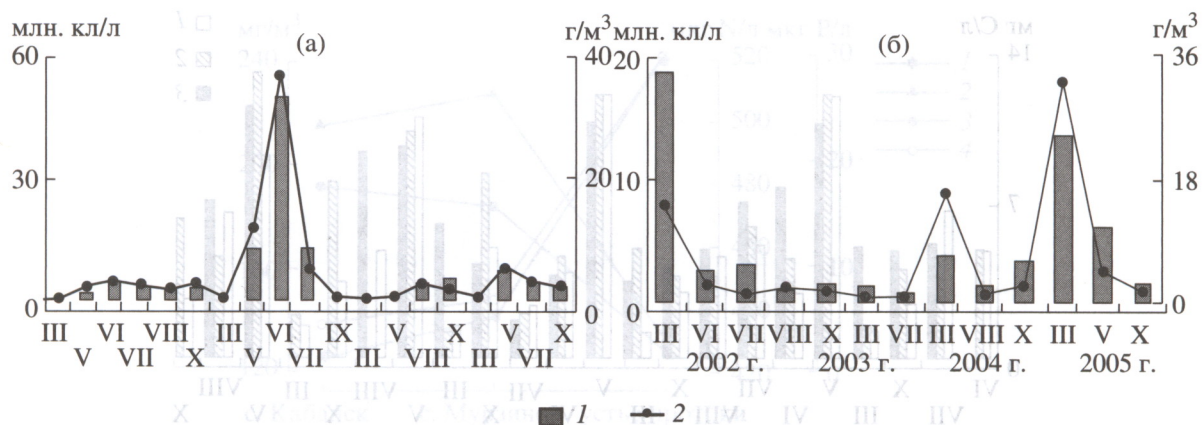


Рис. 6. Изменение численности 1 и биомассы 2 фитопланктона в протоках Харауз (а) и Колпинная (б).

вития фитопланктона по сравнению с июнем из-за низкой обеспеченности питательными веществами при малой водности.

Динамика фитопланктона. В результате исследований 2002–2005 гг. в основном русле и дельтовых протоках р. Селенги обнаружено 250 видов, разновидностей и форм планктонных водорослей, из них синезеленых – 30, золотистых – 44, диатомовых – 34, динофитовых – 10, криптофитовых – 14, эвгленовых – 10, зеленых – 108. Основу видового разнообразия формировали водоросли из отделов зеленых, золотистых и диатомовых, на них приходилось до 74% общего числа видов. В период открытой воды по численности и биомассе преобладали диатомовые водоросли, среди которых наибольшую часть составляли мелкоклеточные центрические диатомовые – *Stephanodiscus makarovae* Genkal, *S. minutulus* (Kütz.) Cleve et Möller, *S. invisitatus* Hohn et Hellerman, *S. hantzschii* Grün., *Cyclotella pseudostelligera* Hust. *Cyclotella dubius* (Fricke) Round. Из пениатных наиболее многочисленны в речных водах были *Nitzschia graciliformis* Lang-Bertalot et Simonsen (*Nitzschia acicularis* W. Sm.), *Synedra acus* subsp. *radians* (Kütz.) Skabitsch., *Asterionella formosa* Hass.

Низкая водность в годы исследований [16, 23] оказала существенное влияние на развитие планктона в водных объектах дельты в отдельные годы и сезоны (рис. 6). В подледный период фитопланктон дельтовых протоков характеризовался значительным разнообразием видового состава. Доминировали в основном пять видов: из золотистых – *Chrysococcus biporus* Skuja и *Dinobryon cylindricum* Imh., из криптофитовых – *Cryptomonas ovata* Ehr., из зеленых – *Chlorogonium popovii* Ustiujan и *Monoraphidium griffithii* Kom. – Legn. Ни один вид диатомовых водорослей в это время не был массовым. Наиболее бедный фитопланктон был в основном русле р. Селенги в районе с. Кабанск, где его численность в отдельные периоды изменялась от 83 до 200 тыс. кл/л, а биомасса – от 128 до 227 мг/м³. К устью проток Харауз и Лобановской его численность и биомасса по-

вышались. Преобладающими видами в этих протоках были *Melosira varians* Ag. и *Chlorogonium popovii*.

В устье протоки Лобановской (по стоку близкой с протокой Харауз) при относительно невысокой численности (234 тыс. кл/л) отмечалась довольно высокая биомасса (833 мг/м³), которая создавалась золотистыми (*Chrysococcus cystophorus* Skuja, *Mallomonas* sp.) и диатомовыми (*Synedra ulna* (Nitzsch.) Ehr., *Aulacoseira granulata* (Ehr.) Simonsen) водорослями. В малых протоках дельты фитопланктон был значительно богаче. Так, в протоке Средней численность фитопланктона превышала 1.7 млн. кл/л. Создавалась она разными группами водорослей: из синезеленых – *Oscillatoria woronichinii* Anissim. (14%), из золотистых – *Chromulina sphaerica* Dofl. *Chrysococcus biporus*, *Dinobryon cylindricum* (65), из зеленых – *Monoraphidium griffithii* и *M. komarkovae* Nyg. (17%). Максимальная численность (18 млн. кл/л) и биомасса (14 г/м³) фитопланктона зарегистрированы в протоке Колпинной зимой (рис. 6) в результате интенсивного развития золотистых (*Chrysococcus biporus* и *Dinobryon cylindricum*) и криптофитовых (*Cryptomonas ovata*) водорослей. Столь высокие концентрации этих видов никогда не отмечались автрами в воде р. Селенги даже в период открытого русла. Массовое их развитие определялось особыми условиями среды – повышенной минерализацией, низкой концентрацией растворенного O<sub>2</sub>, высоким содержанием ОВ [19]. Установлено, что эти два вида (*Cryptomonas ovata* и *Chrysococcus biporus*) могут активно развиваться как в чистых, так и загрязненных водах преимущественно в холодное время года [4, 7]. Очень слабо в этих протоках были представлены диатомовые водоросли, на их долю приходилось всего 1.5% общей численности фитопланктона. Исследования мартовского фитопланктона в дельтовых протоках показали, что все доминирующие виды водорослей находились в стадии интенсивного деления с ярко выраженными хлоропластами, это указывает на то, что физико-химические условия в протоках зимой были весьма благоприятны для их развития.

После освобождения Селенги ото льда повышались общая численность и биомасса фитопланктона (рис. 6). В мае в отличие от подледного периода фитопланктон был представлен исключительно диатомовыми водорослями. Почти во всех протоках и в основном русле реки они занимали до 82–99% общей численности и до 90–99% общей биомассы фитопланктона. Доминирующими видами в это время были мелкоклеточные центрические диатомовые, *Nitzschia graciliformis* и *Synedra acus* subsp. *radians*, субдоминантами – *Melosira varians* и *Synedra ulna*. Другие группы фитопланктона представлены очень слабо. По сравнению с подледным периодом в планктоне повышалось количество бентосных водорослей, что, несомненно, связано с увеличением скорости течения в реке и протоках. Как и в подледный период, в основном русле реки (с. Кабанск) количественные показатели фитопланктона в мае были меньше, чем в устьях проток. В межгодовом аспекте выделялся май 2003 г., который отличался крайне высоким развитием фитопланктона как в реке, так и в протоках дельты (рис. 6).

В июне в составе фитопланктона диатомовые водоросли также занимали лидирующее положение, среди них доминировали *Cyclotella dubius*, *Stephanodiscus invisitatus* и *S. makarova*, несколько снижалась численность *Nitzschia* и *Synedra*. Более интенсивно начинали развиваться зеленые водоросли, наибольшее значение среди которых имели *Monoraphidium arcuatum* (Korsch.) Hind. и *Monoraphidium contortum* (Thur.) Kom. – Legn. На их долю в это время приходилось до 22–66% общей численности фитопланктона, однако значение их в общей биомассе из-за малых размеров было невелико и составляло всего 11–33%. Довольно часто также регистрировались криптофитовые водоросли преимущественно из рода *Cryptomonas*. Роль золотистых в планктоне в это время была незначительна. В большинстве проток общая численность изменялась от 0.5 до 9.2 млн. кл/л, биомасса – от 0.5 до 5.1 г/м<sup>3</sup>. Наиболее низкие значения численности и биомассы фитопланктона отмечены в 2004 г., что может быть связано с несколько повышенной, в сравнении с другими годами, водностью и увеличением в воде взвешенных веществ. Самым экстремальным в развитии фитопланктона был июнь 2003 г. Наблюдаемая численность фитопланктона была максимальной за весь период наблюдений (с 1958 г.) и достигала огромных величин. Общая численность фитопланктона изменялась от 14 до 50 млн. кл/л, биомасса от 10 до 37 г/м<sup>3</sup>. В планктоне доминировали диатомовые водоросли, но в их составе наряду с мелкоклеточными центрическими диатомовыми из рода *Stephanodiscus* в массе развивалась *Synedra acus* subsp. *radians*. Максимальная ее численность отмечена в основном русле реки и протоке Харауз – 12–18 млн. кл/л. Активно развивалась и *Asterionella formosa*. Общая численность диатомовых изменялась от 9 до 39 млн. кл/л, биомасса от 7 до

34 г/м<sup>3</sup>, составляя соответственно 53–83 и 72–90% общей численности и биомассы. Так же активно развивались зеленые водоросли, их численность изменялась от 4 до 18 млн. кл/л. Но из-за малых размеров биомасса была относительно невысокой и не превышала 1.5–3.2 г/м<sup>3</sup>. Во все годы наблюдений июньский фитопланктон в сравнении с майским был богаче как по составу, так и количественно. Впервые отмечено, что при условиях низкой водности р. Селенги, обуславливающих снижение скорости течения и повышение температуры воды, численность и биомасса фитопланктона в реке и протоках могут достигать величин, характерных для гиперэвтрофных водоемов [9].

В июле в разные годы фитопланктон в основном имел общие черты, различаясь интенсивностью развития. В июле 2002, 2004–2005 гг. в реке и протоках развивались в основном мелкоклеточные центрические диатомовые, а также *Aulacoseira granulata* (до 300 мг/м<sup>3</sup>), *Symatopleura solea* (Breb.) W. Smith. При этом постоянные компоненты планктона – *Nitzschia graciliformis* и *Synedra acus* subsp. *radians*, в большинстве проток они составляли >80% общей численности и биомассы планктона. По сравнению с июнем увеличивалось разнообразие зеленых водорослей. Заметное развитие получали различные виды *Scenedesmus*, *Tetrastrum*, *Pediastrum*, *Chlamidomonas*. Общая численность и биомасса фитопланктона колебалась в пределах 2–4.8 млн. кл/л и 1–3.8 г/м<sup>3</sup> соответственно.

Исключение составлял июль 2003 г., когда после июньского максимума произошел резкий спад в развитии фитопланктона. В другие годы в это время наблюдалось увеличение как численности, так и видового разнообразия водорослей. Диатомовые, в массе развивающиеся в майско-июньском планктоне, практически прекратили свое развитие. Их численность снизилась на один – два порядка. Лидирующее положение в планктоне перешло к зеленым водорослям. Они занимали до 56–94% общей численности фитопланктона. Из них наиболее интенсивно развивались *Dictyosphaerium tetrachotomum* Printz., *D. pulchellum*, Wood., *Scenedesmus quadricauda*, (Turp.) Breb. *S. ellipticus* Corda, *Monoraphidium contortum*, *M. arcuatum* и др. Численность зеленых была весьма высокой и изменялась от 2.6 до 12 млн. кл/л, биомасса не превышала 1–2 г/м<sup>3</sup>. Только в протоке Колпинной численность зеленых была низкой (до 180 тыс. кл/л). Необходимо отметить, что несмотря на спад в развитии общая численность фитопланктона в июле в дельтовых протоках была выше, чем в июле других лет – численность составляла 3–15 млн. кл/л, биомасса 1–5 г/м<sup>3</sup> (рис. 6) и обуславливалась преимущественно зелеными водорослями.

В августе видовой состав доминирующих видов и количественные показатели планктона несколько изменялись. Первое место в видовом разнообразии занимали зеленые водоросли, им же принадлежала

ведущая роль в общей численности (до 90%) фитопланктона. В его составе доминировали виды *Scenedesmus*, *Actinastrum*, *Dictyosphaerium* и др. Диатомовые водоросли в августе были немногочисленны. Мелкоклеточные центрические диатомовые из рода *Stephanodiscus* и *Cyclotella* развивались крайне слабо. В большинстве проток постоянными компонентами планктона были криптофитовые водоросли, из которых наиболее часто встречались виды *Cryptomonas*. Общая численность фитопланктона изменялась от 2 до 4 млн. кл/л и мало отличалась от таковой в июле, а биомасса была значительно меньше, так как складывалась преимущественно мелкоклеточными зелеными водорослями.

Осенью (сентябрь–октябрь) в воде проток наблюдался четко выраженный второй максимум в развитии диатомовых (кроме протоки Колпинной), на их долю приходилось до 60–90% общей численности и 78–95% общей биомассы фитопланктона. В это время вновь начинали активно развиваться мелкоклеточные центрические диатомовые, наиболее массовым видом среди которых был *Stephanodiscus hantzschii*. Другие виды диатомовых, как и представители других групп, имели подчиненное значение. Осенний максимум по уровню развития фитопланктона часто сопоставим с весенним, при этом оба максимума обуславливаются, в основном, мелкоклеточными центрическими диатомовыми. Исключение составлял октябрь 2003 г., когда численность фитопланктона была на порядок ниже, чем весной. Численность фитопланктона в осенний период в основном изменялась от 1.3 до 3.6 млн. кл/л, биомасса – от 1.3 до 3.0 г/м<sup>3</sup>.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Многочисленные исследования, выполненные на разных водных объектах, свидетельствуют о том, что динамика концентраций N и P в воде в значительной степени регулируется развитием планктонного сообщества [10]. Анализ результатов, полученных в нижнем течении р. Селенги и протоках ее дельты (рис. 2–5, 6), также показал, что сезонные изменения концентраций минеральных форм N и P в основном обусловлены потреблением их фитопланктоном. Это подтверждается вполне четкой корреляционной связью между содержанием БВ и биомассой фитопланктона. В воде р. Селенги и проток между динамикой концентраций  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  и изменением биомассы фитопланктона коэффициент корреляции в зависимости от сезона изменялся от –0.78 до –0.84 и от –0.59 до –0.61 соответственно. Такая высокая корреляционная связь вполне объяснима, поскольку фитопланктон является основным потребителем БВ. Наиболее устойчивая связь отмечена в мае, когда начинается интенсивное потребление БВ фитопланктоном. Между

изменением содержания  $\text{P}_{\text{орг}}$  и биомассой фитопланктона установлена прямая зависимость, коэффициент корреляции составлял 0.49. Пониженный коэффициент указывает, что концентрации  $\text{P}_{\text{орг}}$  в воде зависят не только от развития фитопланктона, но и от других факторов, в частности, от развития бактериопланктона. Выявленные различия в сезонной динамике БВ в крупных и мелких протоках вызваны не только разным водообменом в них, но и особенностями развития фитопланктона. Так, максимальные концентрации  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  в воде р. Селенги и проток Харауз, Левобережной и Лобановской отмечены зимой при крайне низком содержании водорослей. В воде же протоки Колпинной содержание водорослей в это время было экстремально высоким в сравнении с р. Селенгой, в результате концентрации  $\text{PO}_4^{3-}$  и  $\text{NO}_3^-$  здесь были ниже в 2–5 раз. При этом содержание  $\text{P}_{\text{орг}}$  было выше на 2 порядка, а  $\text{C}_{\text{орг}}$  в 2–3 раза. Так, в воде р. Селенги  $\text{PO}_4^{3-}$  составлял до 78–95% общего содержания P в воде, тогда как в воде Колпинной до 90% составлял  $\text{P}_{\text{орг}}$ . Несмотря на низкое развитие водорослей в зимний период, хорошо прослеживалось их влияние на изменение концентраций БВ и ОВ по длине проток. От с. Кабанск к устью крупных проток (таблица, рис. 3) численность фитопланктона и содержание  $\text{P}_{\text{орг}}$  увеличивались, концентрации минеральных форм N и P снижались.

Как показано выше (рис. 3, 4), концентрации  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  в реке и в крупных протоках зимой достигали своего максимума, что благоприятствовало весеннему развитию фитопланктона. В результате интенсивной вегетации водорослей уже в мае концентрации БВ снижались до минимума. Как следствие, значительную часть вегетационного периода их развитие обеспечивалось за счет поступления БВ с верхних участков реки и регенерации из ОВ, в том числе и автолиза отмирающего планктона. Наиболее показательным в этом плане был 2003 г., когда в июне количественные показатели фитопланктона были максимальными для всего периода наблюдений (рис. 6а), а концентрации  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  в воде минимальными (рис. 4). В июле этого года, вероятно, длительный дефицит БВ и сложившиеся в дельте гидрологические условия привели к резкому спаду продукционных процессов и снижению численности и биомассы фитопланктона,  $\text{C}_{\text{орг}}$  и  $\text{P}_{\text{орг}}$ . В отличие от других лет в это время значительное развитие получили синезеленые водоросли, способные использовать для своего развития также N из воздуха. Обеспечение P, вероятно, осуществлялось за счет регенерируемых  $\text{PO}_4^{3-}$ , скорость оборота которых может составлять до десятков минут [26]. В другие годы исследований, несмотря на низкую водность, обеспе-

ченность БВ в дельте была лучше, чем в 2003 г. (рис. 2). Этому способствовали небольшие паводки в течение вегетационного периода.

Необходимо отметить, что обеспечение фитопланктона и высшей водной растительности N в реке и протоках дельты осуществлялось не только за счет  $\text{NO}_3^-$ , но и  $\text{NH}_4^+$ . После освобождения дельты ото льда доля  $\text{NO}_3^-$  обычно превышала таковую  $\text{NH}_4^+$  в 3–7 раз. По мере поглощения N содержание обеих форм в воде понижалось, но скорость поглощения  $\text{NH}_4^+$  вероятно была выше, так как в июле концентрация  $\text{NO}_3^-$  в воде превышала его значения уже в 7–10 раз. Есть сведения [24], что в водоемах при значениях  $\text{pH} > 7.0$  поглощение  $\text{NH}_4^+$  водной растительностью в 2 раза превышает скорость поглощения  $\text{NO}_3^-$ . Величина  $\text{pH}$  воды в период открытого русла изменялась в пределах 7.2–8.5, т.е. условия для поглощения  $\text{NH}_4^+$  были благоприятными. В июле–августе концентрации как  $\text{NH}_4^+$ , так и  $\text{NO}_3^-$  снижались до минимума. Осенью содержание обеих форм N начинало увеличиваться за счет поступления из отмирающей растительности. В это время их концентрации в воде были приблизительно одинаковые.

Таким образом, полученные результаты показали, что в сравнении с предыдущими исследованиями [2, 8, 12, 25] существенных изменений в сезонной динамике концентраций БВ и фитопланктона не произошло, однако увеличился размах колебаний. В отдельные периоды содержание N и P, состав массовых видов водорослей и уровень их развития в р. Селенге и протоках дельты были близки к таковым в эвтрофных водоемах [9]. Высокие величины фитопланктона вызваны не увеличением в это время антропогенной нагрузки и поступлением БВ, а низкой водностью реки (особенно в 2003 г.), что способствовало улучшению абиотических условий для его развития. Во время половодья и летних паводков содержание фитопланктона в реке и протоках было значительно ниже, хотя концентрации БВ были благоприятными для его развития.

## ВЫВОДЫ

Многолетние исследования позволили выявить особенности функционирования экосистемы р. Селенги и ее дельты при низкой водности. Показано, что в протоках с высоким водообменном внутригодовая и межгодовая динамика БВ и фитопланктона близка к таковой в воде р. Селенги до поступления в дельту. В этих водотоках выявлена высокая корреляционная связь между изменением концентраций

$\text{NO}_3^-$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  и биомассой фитопланктона (коэффициент корреляции равнялся – 0.84 и – 0.61 соответственно). Впервые установлено, что в малых протоках формирование химического состава и развитие фитопланктона в зимний период коренным образом отличается от таковых в воде р. Селенги и крупных протоков. В этих протоках наблюдалось интенсивное развитие золотистых (*Chrysococcus biporus* и *Dinobryon cylindricum*) и криптофитовых (*Cryptomonas ovata*) водорослей, не характерных для реки. В них отмечены повышенные концентрации  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{P}_{\text{орг}}$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$ , что также не регистрировалось в селенгинских водах зимой. Установлено, что в условиях низкой водности численность и биомасса фитопланктона в р. Селенге и протоках могут достигать величин, характерных для эвтрофных и гиперэвтрофных водоемов. При прохождении по дельте значительная часть БВ поглощается водной растительностью и аккумулируется в донных отложениях. Независимо от условий водности в течение всего года дельта р. Селенги является естественным биофильтром БВ, поступающих в Байкал с речным стоком.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байкал. Атлас. М.: Роскартография, 1993. 159 с.
2. Вотиццев К.К., Глазунов И.В., Толмачева А.П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал. М.: Наука, 1965. 495 с.
3. Домьшьева В.М. Закономерности пространственного распределения и динамика кислорода и биогенных элементов в глубоководной области Байкала. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2001. 22 с.
4. Киселев И.А. Пирофитовые водоросли // Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука, 1954. Вып. 6. 210 с.
5. Макарова И.В., Пичкилы И.О. К некоторым вопросам методики вычисления биомассы фитопланктона // Ботан. журн. 1970. Т. 55. № 10. С. 1488–494.
6. Максимова М.П., Елецкий Б.Д., Метревели М.П. Круговорот органического вещества и биогенных элементов в водоемах и водотоках дельты Волги // V Всесоюз. лимнологическое совещ. "Круговорот вещества и энергии в водоемах". Иркутск, 1981. Ч. 5. С. 93–95.
7. Матвиенко А.М. Золотистые водоросли // Определитель пресноводных водорослей СССР. М.: Сов. наука, 1954. Вып. 6. 188 с.
8. Обожин В.Н., Богданов В.Т., Кликунова О.Ф. Гидрохимия рек и озер Бурятии. Новосибирск: Наука, 1984. 152 с.
9. Охалкин А.Г. Динамика видовой структуры потамофитопланктона в водотоках разного типа // Биология внутренних вод. 2000. № 1. С. 53–61.
10. Петрова Н.А. Сукцессии фитопланктона при антропогенном эвтрофировании больших озер. Л.: Наука, 1990. 197 с.

11. *Поповская Г.И.* Об эвтрофикации р.Селенги и зал. Провал на Байкале // Первый Всесоюз. симпозиум по антропогенному эвтрофированию водоемов. Черно-головка, 1974. С. 149.
12. *Поповская Г.И.* Фитопланктон реки Селенги и его изменение // II Всесоюз. лимнологическое совещ. "Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах". Иркутск, 1973. Ч. 2. С. 13–14.
13. *Поповская Г.И.* Фитопланктон Байкала и его много-летние изменения. // Автореф. дис. ... докт. биол. на-ук. Новосибирск: Центральный сибирский ботаниче-ский сад, 1991. 32 с.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометео-издат, 1973. Т. 16. Вып. 3. 400 с.
15. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 534 с.
16. *Синюкович В.Н., Жарикова Н.Г., Жариков В.Д.* Сток реки Селенги в ее дельте // География и природ. ре-сурсы. 2004. № 3. С. 64–69.
17. *Сорокикова Л.М., Поповская Г.И., Синюкович В. и др.* Химический состав воды и фитопланктон водных объектов дельты р. Селенги в подледный период // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 3. С. 349–356.
18. *Сорокикова Л.М., Синюкович В.Н., Дрюккер В.В. и др.* Экологические особенности реки Селенги в условиях наводнения // География и природ. ресурсы. 1995. № 4. С. 64–70.
19. *Сорокикова Л.М., Синюкович В.Н., Ходжер Т.В. и др.* Поступление биогенных элементов и органиче-ских веществ в оз. Байкал с речными водами и атмо-сферными осадками // Метеорология и гидрология. 2001. № 4. С. 78–86.
20. *Строганов Н.С., Бузинова Н.С.* Практическое руко-водство по гидрохимии. М.: Изд-во МГУ, 1980. 193 с.
21. *Тарасова Е.Н., Меищерякова А.И.* Современное состо-яние гидрохимического режима озера Байкал. Ново-сибирск: Наука, 1992. 144 с.
22. *Томберг И.В., Сорокикова Л.М.* Динамика раство-ренного кислорода и рН воды в протоках дельты р. Селенги // Матер. междунар. конф. "Основные факторы и закономерности формирования дельт и их роль в функционировании водно-болотных экоси-стем в различных ландшафтных зонах". Улан-Удэ, 2005. С. 133–134.
23. *Томберг И.В., Сорокикова Л.М., Синюкович В.Н., Погадаева Т.В.* Сток ионов в дельте р. Селенги в условиях малой водности // Метеорология и гидро-логия. 2006. № 12. С. 87–95.
24. *Шокодько Т.И., Ляшенко А.Н.* Ассимиляция высши-ми водными растениями  $^{15}\text{N}$  аммонийных и нитрат-ных ионов при изменении рН среды // V Всесоюз. лимнологическое совещ. "Круговорот вещества и энергии в водоемах". Иркутск, 1981. Ч. 1. С. 142.
25. *Устюжанина Л.А.* Зимне-ранневесенний фитопланк-тон реки Селенги и придельтового участка Байкала // Ботан. журн. 1967. Т. 52. № 5. С. 672–675.
26. *Rigler F.H.* The phosphorus fractions end turnover time of inorganic phosphate in different types of laks // Int. Ver. The-ор. Angew. Limnol. 1964. №. 15. P. 465–470.
27. *Wetzel R. G., Likens G. E.* Limnological Analyses. N.Y.: Springer-Verlag, 1991. 391 p.