

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 556.5+574.5(28)
doi: 10.17223/19988591/65/8

Динамика стока планктона в Верхней Оби

Антон Викторович Котовщик¹, Ольга Сергеевна Бурмистрова²,
Александр Владимирович Дьяченко³

^{1,2,3} Федеральное государственное учреждение науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Барнаул, Россия

¹ kotovschik@iwep.ru,

² burmolga@yandex.ru,

³ dychenko@iwep.ru

Аннотация. По результатам многолетних наблюдений исследованы сезонная динамика и характер межгодовых колебаний стока фитопланктона и зоопланктона в Верхней Оби. Показано, что сезонный максимум стока фитопланктона наблюдается в период летне-осенней межени, но в годы с непродолжительным половодьем он может смещаться на начало лета. В период весенне-летнего половодья сток фитопланктона определяется динамикой расходов воды, а в период летне-осенней межени – величиной биомассы. Сток фитопланктона в разные годы достаточно стабилен и составляет 47–65 тыс. т/год, его величина в большей степени зависит от температуры воздуха в начале лета. Максимум стока зоопланктона наблюдается в начале лета и обусловлен поступлением в русло пойменных вод. В эти периоды, на спаде половодья, сток зоопланктона определяется в большей степени его биомассой, а не объемами воды. Низкий сток зоопланктона в летне-осеннюю межень, несмотря на высокую биомассу, обусловлен низкими расходами воды. Годовые величины стока зоопланктона различаются более значительно, чем сток фитопланктона, за счет разницы в формировании июньских максимумов. Наибольший годовой сток зоопланктона наблюдается в годы с наименьшим годовым стоком фитопланктона.

Ключевые слова: биосток, фитопланктон, зоопланктон, сезонная и межгодовая динамика, гидрологический режим, метеорологические факторы

Источник финансирования: работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН.

Для цитирования: Котовщик А.В., Бурмистрова О.С., Дьяченко А.В. Динамика стока планктона в Верхней Оби // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2024. № 65. С. 148–165. doi: 10.17223/19988591/65/8

Dynamics of plankton runoff in the Upper Ob

Anton V. Kotovshchikov¹, Olga S. Burmistrova², Alexander V. Dyachenko³

^{1, 2, 3} *Institute of Water and Environmental Problems of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia*

¹ *kotovschik@iwep.ru,*

² *burmolga@yandex.ru,*

³ *dychenko@iwep.ru*

Summary. River runoff is usually understood as runoff of water, suspended solids, and sediments. However, river runoff includes both abiotic and biotic components. Drifting living organisms appear in the riverbed or enter there from floodplain reservoirs and tributaries. They exist in runoff constantly (e.g. phyto- and zooplankton) or at certain stages of their life cycle (e.g. drifting larvae of benthic invertebrates). The quantitative assessment of volumes of river-transported biotic components as well as studying their dynamics contribute to the knowledge about the features of structural-functional organisation of aquatic ecosystems and their productivity, in particular. Nevertheless, modern studies on biotic runoff are scanty; they are mainly focused on studying river estuaries and assessing water and substances carryover to the World Ocean. Short-term studies of river runoff in the Upper Ob basin were implemented only in 1962-1963. It is obvious that these investigations can hardly give an idea of seasonal and long-term trends in flow changes as well as factors crucial for these dynamics. The aim of the work is to study the intra-annual dynamics of phytoplankton (in terms of chlorophyll content) and zooplankton runoff in the Upper Ob as well as to identify long-term fluctuations in annual plankton runoff.

In 2001-2002, the research on the Ob River was carried out every ten days, including the freeze-up period, in 2012-2018 – weekly during the open water period, and 2-3 times per season during freeze-up. Sampling was made by means of scooping from the surface water layer at three stations across the river. Phytoplankton was concentrated on membrane filters with a pore diameter of 0.8 microns. To analyse the chlorophyll content in acetone extract, we employed the spectrophotometric method. Zooplankton was concentrated by straining 100 liters of water through a small Apstein net (a mesh size is 62 microns) concurrently with the measurement of water temperature and transparency using a Secchi disk. For runoff quantification, we applied the data on daily water discharge. These data were preliminary adjusted with due regard for our own measurements. At the observation section, we revealed some differences in water characteristics at the site near the right bank, especially during flood recession. For instance, flows from the vast right-bank floodplain formed a water flow along the right bank during these periods. Therefore, instead of arithmetic averages for three stations, the values weighted average by the site width were calculated with consideration of the share of the right-bank flow in the total one. To calculate runoff of components, their concentrations (biomass) were restored (for every day between sampling days) based on linear interpolation. To identify the factors determining features of long-term dynamics of biotic runoff, some hydrometeorological characteristics were calculated for each year of the study (average air temperature, annual water runoff, average water discharge, duration of spring floods, and significant rain floods).

In the course of investigations, daily water runoff during the year had mainly two peaks during the first (April) and second (late May-June) waves of spring-summer flood. Seasonal dynamics of phytorunoff (in terms of chlorophyll a content) had several maxima. The first occurred in April during active snowmelt and intensive surface flush,

when mainly non-planktonic species and algal detritus prevailed. The second peak (from late May to early June) was usually owing to large volumes of water runoff, but not high phytoplankton concentrations. The third maximum took place almost annually during the greatest warming of water (from the end of June to the end of July), however, at a prolonged flood it may not be pronounced. In the studied river section, the formation of a late summer maximum of phytorunoff (from late August to mid-September) was common; in some years it could exceed the summer peak. In extremely low-water years, a high early-summer maximum of phytorunoff was, apparently, induced by the absence of a second wave of high water, which may be enhanced by favourable weather conditions providing earlier warming of the water. The share of phytorunoff during the open water period made up 97-98% of total annual flow. In general, seasonal dynamics of phytorunoff during high water depended on water discharge, whereas in a summer-autumn low-water period – on phytoplankton content. Dynamics of zooplankton biomass runoff also had several peaks (with the major one in the second and third decades of June at spring-summer flood recession) caused by abundant zooplankton inflow from floodplain reservoirs; in the years with extremely high flood, it can reach hundreds of tons per day. Insignificant peaks of zooplankton runoff in mid-, late-summer were specific only for some years. In different years, annual algae runoff was similar (305-405 tons of chlorophyll), thus indicating stability of autotrophic link development of the Upper Ob ecosystem in the long-term aspect. At the same time, the greatest phytorunoff was noted in the years with low- and medium-water content and the highest summer air temperature. Current annual flow of phytoplankton biomass in the Upper Ob is 2-3 times higher than 50 years ago that is evidence of the increase in productivity of this river ecosystem. As compared to algae, inter-annual fluctuations in zooplankton runoff in the Upper Ob are much more significant, i.e., annual indicators may differ by almost 20 times (0.5-5.8 thousand tons). Most annual zooplankton runoff is formed at flood recession during the June maximum due to its intake from floodplain reservoirs. Interestingly, maximum annual zooplankton runoff tends to appear in the years with minimum annual phytoplankton runoff.

Our study demonstrates the dependence of seasonal dynamics of biotic runoff on the features of hydrological river regime. Changes in values of zooplankton and phytoplankton runoff depend on different factors. During spring-summer flooding, phytoplankton runoff is determined by water discharge, and by phytoplankton content – during summer-autumn low water. Maxima of zooplankton runoff during the year, mainly caused by floodplain waters inflow to the river, takes place in early summer when zooplankton runoff is much more influenced by zooplankton content than water volume at flood recession. Despite high biomass, low runoff of zooplankton during summer-autumn low water is a result of low water discharge. As compared to phytoplankton, annual zooplankton runoff varies more significantly (0.5-5.8 thousand tons) because of different formation of June maxima. The presented findings suggest the importance of biotic runoff calculations in assessing the relationship between dynamics of plankton communities from large rivers with hydrological and hydrometeorological factors.

The article contains 4 Figures, 2 Tables, 32 References.

Keywords: biorunoff, phytoplankton, zooplankton, seasonal and interannual dynamics, hydrological regime, meteorological factors

Fundings: The work was carried out within the framework of the state assignment of the IWEP SB RAS.

For citation: Kotovshchikov AV, Burmistrova OS, Dyachenko AV. Dynamics of plankton runoff in the Upper Ob. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2024;65:148-165. doi: 10.17223/19988591/65/8

Введение

Речной сток в широком понимании – это процесс, определяющий взаимодействие между водами суши и океаном и связанный с геологическими, географическими, физическими, химическими и биологическими факторами. Этот процесс обуславливает круговорот веществ и энергии как на глобальном уровне, так и в конкретном водном объекте. Огромное значение в этом процессе имеют биологические факторы [1]. Речные системы отличаются от стоячих водоемов интенсивной турбулентностью вод, которая обуславливает гомогенность распределения организмов во всей водной толще [2]. Образующееся при данных условиях живое вещество непрерывно перемещается течением, поэтому возникает необходимость количественного учета этого переноса. Одномоментное содержание организмов фито- и зоопланктона в определенном объеме речной воды не дает полного представления об уровне и динамике развития планктонного звена экосистемы. Важно учитывать еще и сток организмов, т.е. их количество (массу), проходящее через данное сечение реки в единицу времени. Изучение формирования стока планктона в крупной равнинной реке важно для выявления как региональных, так и глобальных особенностей функционирования речных экосистем. Количественная оценка переносимых рекой биотических компонентов, а также выяснение характера внутри- и межгодовой динамики их стока является одной из фундаментальных задач гидробиологии при изучении рек.

В настоящее время работы по биотическому стоку практически отсутствуют. Очевидно, это связано с трудностями сбора данных постоянных режимных наблюдений, являющихся основой для расчета. Целью подобных современных исследований на крупных реках является в основном оценка влияния стока пресной воды, растворенных и взвешенных веществ на характеристики морских вод [3]. Исследования влияния речного стока на содержание различных веществ и продуктивность фитопланктона проводятся в устьях и эстуариях крупных рек, а также в морских заливах [4–6]. При изучении фитопланктона крупных рек важное значение имеют его структура и долговременная динамика [7], а также установление связи его развития с расходами воды. Водный сток определяет «время удержания» и количественное развитие водорослей [8]. Изменения климата, способствующие уменьшению водного стока крупных рек, увеличивают актуальность изучения факторов чрезмерного развития фитопланктона при снижении расходов воды [9].

Первые исследования стока фитопланктона в верхнем течении р. Оби были выполнены в 1962 г. и после этого проводились только в устье реки [10–13]. Из рек бассейна Оби годовой сток фитопланктона изучали в бассейне р. Чулым при проектировании водохранилищ КАТЭК [14]. Известны работы, посвященные стоку водорослей Среднего Дуная [15] и Волги в районе г. Самары [16], проводимые в периоды гидроэнергетического строительства на этих реках. Сток зоопланктона в сезонном и межгодовом аспектах изучали в 1980-е гг. только на Нижней Оби [13, 17–20].

Целью работы является изучение внутригодовой динамики стока фитопланктона и зоопланктона в Верхней Оби, а также выявление характера многолетних колебаний годовых объемов планктонного стока.

Река Обь у г. Барнаула характеризуется как типично равнинная; уклоны дна изменяются в пределах 0,07–0,11%. Средний многолетний водный сток ($\text{км}^3/\text{год}$) – 46,6, наибольший – 72,5, наименьший – 32,2 [21]. Скорость течения в период осенней межени составляет 0,7–1,0 м/с, возрастая во время половодья до 1,5 м/с. Пойма значительно развита и представляет собой заболоченную равнину, расчлененную протоками и старицами. В период весеннего половодья пойма почти ежегодно заливается водой. Ледостав на данном участке реки длится в среднем около пяти месяцев (с 10 ноября до 15 апреля).

Материалы и методы

Исследования проводили в 2001–2002 гг. ежедекадно, включая период ледостава; в 2012–2018 гг. еженедельно в период открытой воды и 2–3 раза за сезон во время ледостава. Пробы отбирали зачерпыванием из поверхностного слоя воды на трех станциях створа в черте г. Барнаула ($53^{\circ}19'20''$ с.ш., $83^{\circ}48'15''$ в.д.). Створ расположен на 234-м км р. Оби, ниже городских водозаборов и выше поступления сточных вод. Фитопланктон концентрировали на мембранных фильтрах «Владипор» с диаметром пор 0,8 мкм. Биомассу рассчитывали по содержанию хлорофилла, которое определяли спектрофотометрическим методом в ацетоновом экстракте [22]. Согласно собственным данным за предыдущие годы, в периоды интенсивного развития фитопланктона в Верхней Оби биомасса составляла 3–6 г/м³. Содержание хлорофилла *a* в биомассе в разные сезоны варьировало в пределах 0,55–0,77% с минимумом в период половодья, максимумом – в летне-осеннюю межень. Зоопланктон концентрировали процеживанием 100 л воды через малую сеть Апштейна с размером ячеек 62 мкм. Одновременно измеряли температуру воды и прозрачность по диску Секки. Для расчета стока использовали данные Росгидромета о ежедневных расходах воды в створе водомерного поста, которые были скорректированы для створа наблюдений с учетом собственных измерений. Для измерения расходов воды был использован аппаратно-программный комплекс Sontek RiverSurveyor Live, который включает в себя акустический доплеровский измеритель скорости течения Sontek ADP M9, а также программное обеспечение. Статистическую обработку данных проводили с помощью пакета программ STATISTICA 10.0. Для корреляционного анализа использовали коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

В створе наблюдения существенно различались характеристики воды на правобережной и левобережной станции, особенно на спаде половодья. В эти периоды у правого берега присутствовала струя воды, сформированная поступлениями с обширной правобережной поймы. В таких случаях вместо среднеарифметических для трех станций рассчитывали средневзвешенные значения по ширине створа, учитывающие долю правобережной струи в общем расходе воды.

При расчете биостока восстанавливали значения биомассы для каждого суток между днями отбора проб методом линейной интерполяции. Расчет стока компонентов проводили по формуле

$$R = 8,64 \times 10^{-5} \times Q \times C,$$

где R – сток планктона (т/сут), Q – расход воды (м³/с), C – биомасса планктона (мг/м³), $8,64 \times 10^{-5}$ – коэффициент, учитывающий количество секунд в сутках и м³ в 1 км³.

Ежемесячный и годовой сток компонентов получали суммированием суточных значений.

Результаты исследования

Для анализа были рассчитаны некоторые гидрометеорологические характеристики для каждого года исследования (табл. 1). Кроме средней температуры воздуха за вегетационный период (апрель–октябрь), анализировали среднюю температуру воздуха в июне, имеющую наибольшую межгодовую вариабельность.

Таблица 1 [Table 1]

**Гидрометеорологические характеристики р. Оби
у г. Барнаула в исследованные годы**
[The hydrometeorological characteristics of the river Ob near Barnaul in the studied years]

Год, водность [Year, river flow]	Средняя температура воздуха в апреле–октябре [Average air temperature in April–October], °C	Средняя температура воздуха в июне [Average air temperature in June], °C	Годовой водный сток [Annual water flow], км ³	Средний расход воды за апрель–октябрь [Average water flow for April–October], м ³ /с	Продолжительность весеннего половодья [Duration of spring flood], days	Продолжительность значительных дождевых паводков [Duration of major rain floods], days
2001, многоводный [high-water]	12,7	18,5	55,6	2 660	68	0
2002, средний по водности [mid-water]	12,3	17,6	50,3	2 390	62	4
2012, очень маловодный [very low-water]	14,2	22,1	33,4	1 558	0	5
2013, многоводный [high-water]	11,7	15,8	63,2	2 958	100	9
2014, средний по водности [mid-water]	12,1	18,0	50,3	2 265	41	6

Год, водность [Year, river flow]	Средняя температура воздуха в апреле–октябре [Average air temperature in April–October], °C	Средняя температура воздуха в июне [Average air temperature in June], °C	Годовой водный сток [Annual water flow], km ³	Средний расход воды за апрель–октябрь [Average water flow for April–October], m ³ /s	Продолжительность весеннего половодья [Duration of spring flood], days	Продолжительность значительных дождей паводков [Duration of major rain floods], days
2015, средний по водности [mid-water]	13,2	19,6	47,8	2 222	65	4
2016, многоводный [high-water]	12,8	19,6	53,3	2 504	66	0
2017, средний по водности [mid-water]	12,6	19,8	48,4	2 237	55	3
2018, средний по водности [mid-water]	12,4	20,1	49,9	2 367	76	5

Динамика водного стока в исследованном створе характеризовалась в большинстве случаев двухвершинной кривой с максимумами во время первой (апрель) и второй (конец мая – июнь) волны весенне-летнего половодья. Первый максимум суточного стока составлял в разные годы от 0,18 (маловодный 2012 г.) до 0,39 км³/сут (многоводный 2001 г.). Второй максимум, как правило, превышал первый и составлял от 0,37 до 0,69 км³/сут. В некоторые годы второй пик мог быть не выражен (2012 г.), выражен слабо (2015 г.) или равен первому (2017 г.). Сток воды в период ледостава был стабилен в межгодовом аспекте и составлял 0,03–0,04 км³/сут.

Сезонная динамика стока фитопланктона существенно различалась в разные годы, но также имела и общие черты (рис. 1). Первый небольшой максимум стока фитопланктона (250–450 т/сут) отмечали в апреле (реже – в начале мая), вскоре после освобождения реки ото льда. В этот период активного снеготаяния и интенсивного поверхностного смыва преобладают в основном случайно планктонные виды водорослей. По числу видов наиболее разнообразны донные формы и обрастатели, по биомассе доминируют в основном крупные пенистые диатомеи [23]. Второй более выраженный максимум (700–1100 т/сут) отмечали обычно во время второй волны весенне-летнего половодья в конце мая – начале июня. Он обусловлен в основном большим объемом водного стока, а не биомассой фитопланктона. Исключение составлял аномально маловодный 2012 г., когда в июне в отсутствие второй волны половодья на реке наблюдали меженные гидрологические условия (низкий уровень и высокую прозрачность воды), а жаркая антициклональная погода обеспечила прогрев воды на 5°С выше среднемноголетнего значения [24], что спровоцировало интенсивное развитие фитопланктона.

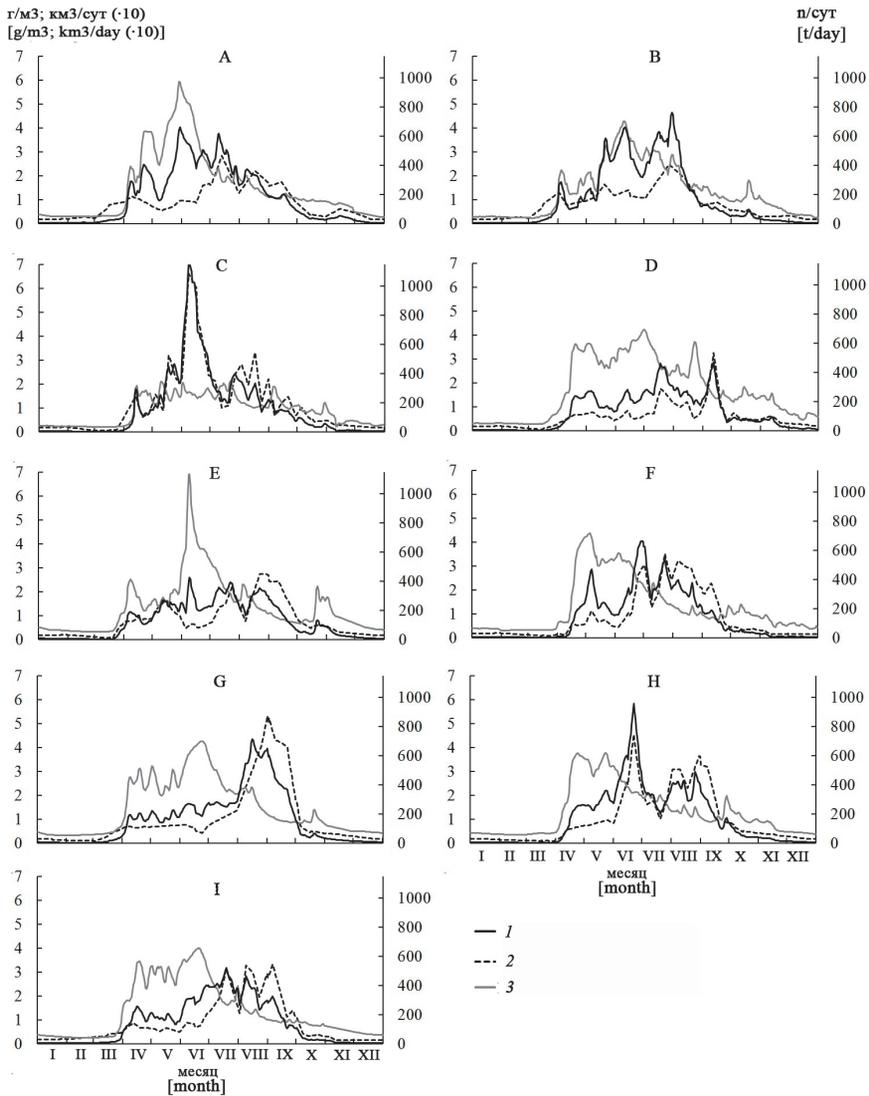


Рис. 1. Сезонная динамика показателей стока фитопланктона в 2001, 2002, 2012–2018 гг. (A–I соответственно): 1 – сток биомассы (правая ось); 2 – биомасса (левая ось); 3 – сток воды (левая ось)

[Fig. 1. Seasonal dynamics of phytoplankton runoff indicators in 2001, 2002, 2012–2018 (A–I, respectively): on the X-axis – month, 1 – phytoplankton runoff (right Y-axis), t/day; 2 – phytoplankton biomass (left Y-axis), g/m³; 3 – water runoff, (left Y-axis), km³/day·10]

Раннелетний пик отсутствовал в годы с очень длительным стоянием (до начала июля) высокого уровня половодья (2013 и 2016 гг.). Летний максимум наблюдали практически ежегодно во время наибольшего прогрева воды с конца июня до конца июля (500–750 т/сут). В годы с длительным половодьем этот максимум выражен не был (2016 г.). К своеобразию сезонной

динамики фитостока исследованного участка р. Оби относится формирование летне-осеннего максимума, который составлял в разные годы около 500 т/сут. В предыдущих исследованиях пик развития фитопланктона в это время или не наблюдался, или был незначительным [25, 26]. В последнее время он отмечался почти ежегодно.

Суточный сток зоопланктона также менялся как в сезонном, так и в межгодовом аспектах (рис. 2).

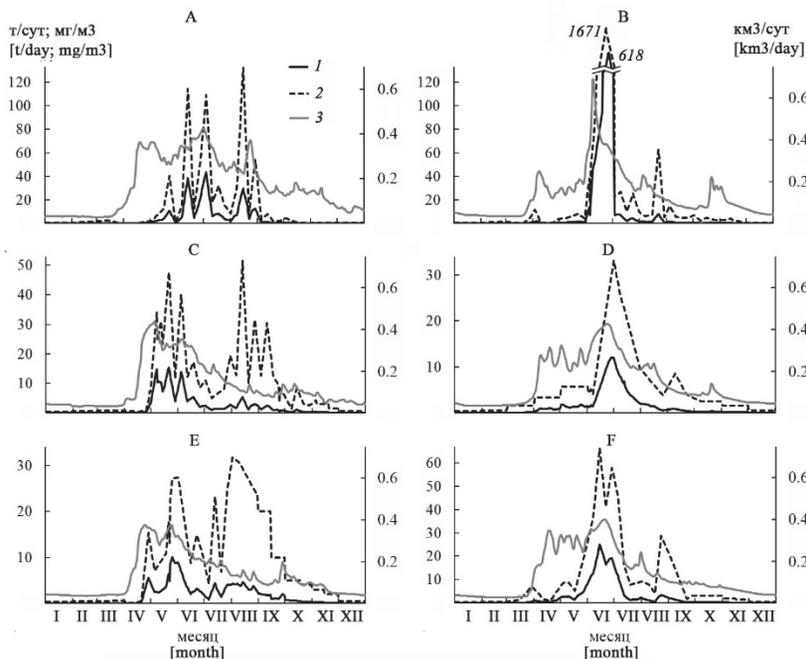


Рис. 2. Сезонная динамика показателей стока зоопланктона в 2013–2018 гг. (A–F соответственно): 1 – сток биомассы (левая ось); 2 – биомасса (левая ось); 3 – сток воды (правая ось)

[Fig. 2. Seasonal dynamics of zooplankton runoff indicators in 2013–2018 (A–F, respectively): on the X-axis – month, on the left Y-axis – zooplankton biomass runoff, t/day; zooplankton biomass, mg/m³, on the right Y-axis – water runoff, km³/day]

Первый небольшой максимум (10–15 т/сут) отмечен только в мае 2015 и 2017 гг. Более типичным был первый летний пик с величинами от 11 до 39 т/сут, который наблюдался почти ежегодно во второй и третьей декаде июня. Он проявлялся на спаде второй волны весенне-летнего половодья и был обусловлен поступлением в русло Оби зоопланктона из хорошо прогреваемых пойменных водоемов во время разлива в начале июня. В 2013 г. при длительном половодье с его затяжным спадом июньский пик продолжался до начала июля и достигал 43 т/сут. Аномально высокий суточный сток зоопланктона (618 т/сут) наблюдался в конце июня 2014 г. вследствие экстремального паводка в начале месяца [27]. Огромные массы воды с богатым пойменным планктоном выносило в русло реки во время длительного спада

уровня, при этом биомасса зоопланктона достигала 12 г/м^3 . В периоды наибольшего прогрева воды (вторая половина июля) пик стока зоопланктона (до 8–14 т/сут) отмечали только в отдельные годы. В 2013 и 2018 гг. наблюдали позднелетний максимум стока в августе–сентябре.

При оценке вклада рек в общую биологическую продуктивность водных экосистем важно оценить годовые объемы стока фито- и зоопланктона, а также выявить их межгодовые колебания. Изученный створ р. Оби характеризовался величинами годового водного стока от 33,4 до 63,2 (в среднем 50,2) $\text{км}^3/\text{год}$. Годовой сток фитопланктона был достаточно стабилен в многолетнем аспекте и изменялся от 47 до 65 тыс. т (рис. 3). Наибольший сток водорослей наблюдали в маловодные и средние по водности годы с высокой средней температурой воздуха, наименьший – в многоводные и средние по водности годы с низкой температурой воздуха (2013 и 2014 гг.). Годовые величины стока зоопланктона различались более чем в 10 раз – от 0,5 до 5,8 тыс. т (см. рис. 3) с максимумом в 2014 г. – средним по водности годом с экстремальным паводком в начале лета, вызвавшим поступление зоопланктона из поймы. Межгодовые колебания стока зоопланктона в Верхней Оби значительно превосходили колебания стока фитопланктона.

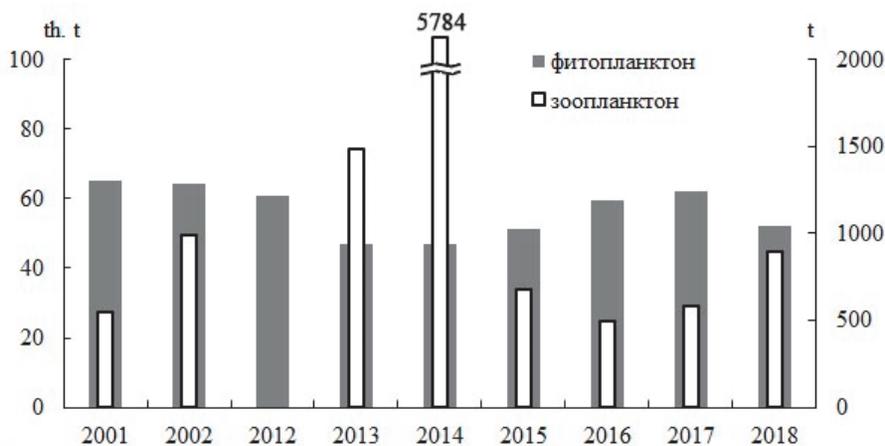


Рис. 3. Многолетняя динамика планктонного стока в Верхней Оби: левая ось – сток фитопланктона, тыс. т/год; правая ось – сток зоопланктона, т/год
 [Fig. 3. The long-term dynamics of plankton runoff in the Upper Ob: left axis – phytoplankton runoff, th. t/year; right axis – zooplankton runoff, t/year]

Обсуждение результатов

Известно, что лимитирующими факторами развития фитопланктона в крупных реках являются доступность света и время удержания воды [28, 29]. Для Верхней Оби выявлена положительная связь сезонной динамики хлорофилла *a* с температурой воды в период летне-осенней межени и с прозрачностью в период половодья. Угнетение развития фитопланктона наблюдается во время паводков при уменьшении прозрачности, увеличении ско-

рости течения и расходов воды [30]. Именно особенности сезонной динамики фитопланктона вместе с динамикой расходов воды определяют внутригодовую динамику его стока. В периоды половодья или паводков максимумы стока фитопланктона зависят не от развития водорослей, а от объема водного стока. Обратная картина наблюдается в меженный период, когда высокий фитосток обуславливается высоким обилием фитопланктона.

Согласно предыдущим данным, годовой сток фитопланктона в створе г. Барнаула в 1963 г. составлял 23 тыс. т, а в створе г. Камень-на-Оби в 1962 и 1963 гг. – 31 и 16 тыс. т соответственно [10, 11]. В годы наших исследований годовой фитосток у г. Барнаула увеличился до 47,0–65,2 тыс. т, а в створе г. Камень-на-Оби в 2020 г. достиг 109 тыс. т. Таким образом, по прошествии 50 лет произошло увеличение стока фитопланктона в Верхней Оби в 2–3 раза. Водность реки за этот период существенно не изменилась, поэтому значительно возросший сток водорослей связан, очевидно, с увеличением их обилия и продолжительности вегетации.

Предыдущие исследования позволяют проследить многолетний характер нарастания стока фитопланктона в р. Оби. В Средней Оби его величина в 1986–1988 гг. колебалась от 65 до 161 тыс. т [31]. То есть минимальный годовой сток фитопланктона в Средней Оби 35 лет назад был сопоставим с современным стоком в Верхней Оби. Исследования, проведенные на Нижней Оби, показали значительные вариации годового стока фитопланктона, который составлял в разные годы 238–592 тыс. т. [13, 21]. Установлено, что сток фитопланктона в Нижней Оби зависит от водности года, прогрева водных масс и концентрации планктонных организмов. Водный сток имел при этом большое, но не определяющее значение [19]. Такой же вывод был сделан при изучении стока водорослей в малых реках бассейна р. Чулым [14].

Среди других крупных сибирских рек сток фитопланктона был изучен в р. Енисей ниже плотины Красноярской ГЭС [32]. Расположение этого участка ниже водохранилища обусловило повышенное обилие фитопланктона по сравнению с состоянием до зарегулирования. В нижнем бьефе наблюдали более интенсивное развитие истинно планктонных видов водорослей и увеличение роли цианопрокариот. Годовой сток фитопланктона здесь составлял 499–521 тыс. т/год, т.е. на порядок больше, чем в р. Оби у г. Барнаула в годы наших исследований, и в пять раз больше, чем в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС в 2020 г. (101 тыс. т/год). Поскольку биомасса фитопланктона в р. Енисей не превышала 1,5 г/м³, то высокий фитосток был обусловлен большими величинами водного стока (70–74 км³). Сезонные максимумы последнего совпадали с наибольшим обилием водорослей, чего не происходит в Верхней Оби.

Современных исследований стока фитопланктона в реках европейской части страны не проводилось. Работы предыдущих лет показали, что сток фитопланктона Волги и Днепра выше, чем в Оби [15, 16], что связано с более продолжительным вегетационным периодом и более высоким обилием водорослей, чем в реках Сибири.

Изучение стока зоопланктона р. Оби в предыдущие годы проводилось только в ее нижнем течении. Годовой сток на этом участке в разные годы

варьировал от 15 до 74 тыс. т и был наибольшим в средний по водности год [13, 18]. Эти значения на 1–2 порядка выше полученных нами для Верхней Оби. Вместе с тем минимальный сток зоопланктона в Нижней Оби всего в три раза превышает аномально высокий сток в верхнем течении (6 тыс. т).

Для выявления связей многолетних колебаний показателей биотического стока и гидрометеорологических условий был проведен корреляционный анализ (табл. 2). Отрицательная связь среднегодовой биомассы фитопланктона с величинами водного стока и особенно с продолжительностью дождевых паводков определяется ухудшением условий для развития фитопланктона в многоводные годы.

Таблица 2 [Table 2]

Коэффициенты корреляции многолетних колебаний показателей речного стока и гидрометеорологических условий в Верхней Оби (2001, 2002, 2012–2018 гг.)
 [The correlation coefficients of multi-annual fluctuations in river runoff and hydrometeorological conditions in the Upper Ob (2001, 2002, 2012–2018)]

Показатели [Indicators]	Годовой водный сток [Annual water flow]	Годовой сток фитопланктона [Annual runoff of phytoplankton]	Среднегодовая биомасса фитопланктона [Average annual phytoplankton biomass]	Годовой сток зоопланктона [Annual runoff of zooplankton]
Годовой сток фитопланктона [Annual runoff of phytoplankton]	–0,05			
Среднегодовая биомасса фитопланктона [Average annual phytoplankton biomass]	–0,51	0,58		
Годовой сток зоопланктона [Annual runoff of zooplankton]	0,11	–0,46	–0,86	
Средний расход воды за апрель–октябрь [Average water flow for April-October]	0,97	0,04	–0,45	0,11
Продолжительность весеннего половодья [Duration of spring flood]	0,65	–0,16	–0,38	0,29
Продолжительность значительных дождевых паводков [Duration of major rain floods]	–0,04	–0,73	–0,57	0,93
Средняя температура воздуха в апреле–октябре [Average air temperature in April-October]	–0,59	0,36	0,78	–0,79
Средняя температура воздуха в июне [Average air temperature in June]	–0,76	0,20	0,83	–0,41

Примечание. Жирным шрифтом указаны коэффициенты корреляции, значимые при $p \leq 0,05$.

[Note. Correlation coefficients that are significant at $p \leq 0.05$ are indicated in bold].

Температура воды является важнейшим фактором для развития фитопланктона и определяется температурой воздуха. Нами выявлено, что

наибольшее влияние на годовой уровень развития фитопланктона в Верхней Оби оказывает температура воздуха в июне (рис. 4, А), которая определяет наличие и величину раннелетнего максимума водорослей.

Зоопланктон, развивающийся непосредственно в русле Оби, сравнительно беден. Положительное влияние на величину стока зоопланктона оказывает поступление из поймы, которое определяется в том числе продолжительностью дождевых паводков. Эта зависимость косвенно объясняет отрицательную связь стока зоопланктона с температурой воздуха, так как в годы с обильными паводками наблюдалась более низкая температура.

Пойменные воды не оказывают положительного влияния на развитие фитопланктона в русле Оби. Низкое содержание фитопланктона в пойменных водах, очевидно, обусловлено его выеданием зоопланктоном. Поэтому наибольшее обилие и сток водорослей в русле Оби наблюдаются в периоды минимального поступления из поймы. Эта особенность находит свое отражение в отрицательной связи среднегодовой биомассы фитопланктона и величин годового стока зоопланктона (рис. 4, В), исключая год с аномальным паводком.

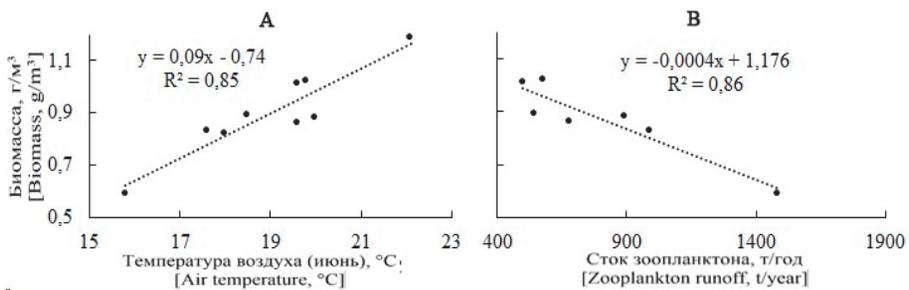


Рис. 4. Связь многолетних колебаний среднегодовой биомассы фитопланктона в Верхней Оби с температурой воздуха в июне (А) и величиной годового стока зоопланктона (В)

[Fig. 4. Relationship between multi-annual fluctuations of phytoplankton biomass (Y-axis) in the Upper Ob with air temperature in June (А) and zooplankton runoff (В) (X-axis)]

Заключение

Таким образом, анализ сезонной динамики и межгодовых колебаний водного и планктонного стока Верхней Оби выявил следующие особенности. Суточный водный сток в течение года в основном характеризуется двумя максимумами во время первой (апрель) и второй (конец мая – июнь) волны весенне-летнего половодья. В сезонной динамике стока фитопланктона прослеживается несколько максимумов. Первый отмечается в апреле в период активного снеготаяния и интенсивного поверхностного смыва, когда преобладают в основном непланктонные виды и водорослевый детрит. Второй максимум в конце мая – начале июня обусловлен в основном большими величинами водного стока, а не развитием фитопланктона. Третий максимум наблюдается практически ежегодно во время наибольшего прогрева воды с конца июня до конца июля, но может быть не выражен при очень

длительном половодье. На исследованном участке реки обычным является формирование позднелетнего максимума стока фитопланктона (конец августа – середина сентября), который в отдельные годы может превышать летний. В экстремально маловодные годы может отмечаться высокий раннелетний максимум, обусловленный отсутствием второй волны половодья, который может быть усилен благоприятными погодными условиями, обеспечивающими более ранний прогрев воды. Доля стока фитопланктона за период открытой воды составляет 97–98% от годовых величин. В целом его сезонная динамика в период половодья определяется величинами расходов воды, а в период летне-осенней межени – биомассой фитопланктона. В динамике стока зоопланктона также прослеживается несколько максимумов. Основной из них проявляется во второй и третьей декаде июня на спаде весенне-летнего половодья. Он обусловлен поступлением в русло реки зоопланктона пойменных водоемов и в годы с экстремально высоким паводком может достигать сотен тонн в сутки. Небольшие пики стока зоопланктона в середине лета, а также позднелетние максимумы отмечаются только в отдельные годы. Величины годового стока водорослей близки для разных лет (47–65 тыс. т), что свидетельствует о стабильности уровня развития автотрофного звена экосистемы Верхней Оби в многолетнем аспекте. Вместе с тем наибольший сток фитопланктона наблюдается в маловодные и средние по водности годы с высокой летней температурой воздуха. Современные значения годового стока фитопланктона в Верхней Оби в 2–3 раза превышают таковые, полученные 50 лет назад, что свидетельствует об увеличении продуктивности речной экосистемы.

Межгодовые показатели стока зоопланктона в Верхней Оби различаются почти в 20 раз (от 0,5 до 5,8 тыс. т), что намного выше, чем различия стока водорослей. Основной объем годового стока зоопланктона формируется во время июньского максимума на спаде половодья за счет поступления из пойменных водоемов. Наибольший годовой сток зоопланктона наблюдается в годы с наименьшим годовым стоком фитопланктона.

Список источников

1. Муравейский С.Д. Реки и озера: гидробиология, сток. М.: Гос. изд-во геогр. литературы, 1960. 388 с.
2. Wheeler J.D., Secchi E., Rusconi R., Stocker R. Not Just Going with the Flow: The Effects of Fluid Flow on Bacteria and Plankton // *Annual Review of Cell and Developmental Biology*. 2019. Vol. 35(1). PP. 1–25. doi: 10.1146/annurev-cellbio-100818-125119.
3. Stein R., Fahl K., Fütterer D.K., Galimov E.M. and Stepanets O.V. (Editors) *Siberian River Run-off in the Kara Sea: Characterisation, Quantification, Variability and Environmental Significance*. Amsterdam: Elsevier, 2003. 488 p.
4. Malone T.C., Crocker L.H., Pike S.E., Wendler B.W. Influences of river flow on the dynamics of phytoplankton production in a partially stratified estuary // *Marine Ecology – Prog. Ser.* 1988. Vol. 48. PP. 235–249.
5. Chase Z., Strutton P.G., Hales B. Iron links river runoff and shelf width to phytoplankton biomass along the U.S. West Coast // *Geophysical research letters*. 2007. Vol. 34. P. L04607.
6. Shulkin V.M., Orlova T.Yu., Shevchenko O.G., Stonik I.V. The effect of river runoff and phytoplankton production on the seasonal variation of the chemical composition of coastal

- waters of the Amursky Bay, Sea of Japan // Russian Journal of Marine Biology. 2013. Vol. 39, № 3. PP. 197–207.
7. Dokulil M.T., Donabaum U. Phytoplankton of the Danube River: Composition and Long-Term Dynamics // Acta zoologica Bulgarica. 2014. Suppl. 7. PP. 147–152.
 8. Fulton R.S., Hendrickson J.C. Appendix 8.A. Relationships of Water Flows with Plankton and Water Quality. Palatka, Florida, 2011. 16 p.
 9. Shawn M.G., Gretchen G. Environmental factors controlling phytoplankton dynamics in a large floodplain river with emphasis on cyanobacteria // River Research and Applications. 2020. Vol. 36(3). doi: 10.1002/rra.3658
 10. Солоневская А.В. Динамика сезонного развития и сток фитопланктона Верхней Оби на участке г. Камень – с. Дубровино // Водоросли и грибы Западной Сибири. Ч. 1.: Тр. ЦСБС. Вып. 8. Новосибирск, 1964. С. 69–81.
 11. Солоневская А.В. Сток фитопланктона Верхней Оби за 1963 г. // Водоросли и грибы Западной Сибири. Новосибирск : Наука, 1965. Ч. 2. С. 16–23.
 12. Солоневская А.В. Сток фитопланктона Нижней Оби // Гидростроительство и рыбное хозяйство в Нижней Оби. Тюмень : Изд-во СибНИИРХ, 1966. С. 77–91.
 13. Семенова Л.А., Лелеко Т.И., Алексюк В.А. Сток планктона Нижней Оби // Изучение реки Оби и ее притоков в связи с хозяйственным освоением Западной Сибири. Л. : Изд-во Росрыбхоз, 1989. Вып. 305. С. 56–65.
 14. Чайковская Т.С. Фитопланктон и сапробиологическая оценка качества вод р. Урюп и ее притоков // Комплексные исследования водных ресурсов Сибири : Тр. Зап.-Сиб. регион. НИИ. Вып. 56. М. : Гидрометеиздат, 1983. С. 131–137.
 15. Ролл Я.В., Марковский Ю.М. Планктосток среднего Днепра в связи с прогнозом будущего Кременчугского водохранилища // Зоол. журн. 1955. Т. 34, вып. 3. С. 506–517.
 16. Кузнецова А.А. Динамика и сток фитопланктона р. Волги в районе г. Куйбышева // Тр. проблемных и тематических совещаний. Вып. 7: Проблемы гидробиологии внутренних вод. 1957. № 3. С. 108–110.
 17. Крохалевская Н.Г., Алексюк В.А., Семенова Л.А. Видовой состав зоопланктона водоемов Нижней Оби // Рыбное хозяйство на водоемах Западной Сибири. Л. : ГосНИОРХ, 1981. Вып. 171. С. 100–105.
 18. Крохалевская Н.Г., Алексюк В.А. Зоопланктон, его продукция и сток биомассы в нижнем течении Оби // Биология и экология гидробионтов экосистемы Нижней Оби. Свердловск : Изд-во УНЦ АН СССР, 1983. С. 3–11.
 19. Семенова Л.А., Лелеко Т.И., Алексюк В.А. Многолетние исследования стока водорослей и зоопланктона Нижней Оби // Тез. докл. VI съезда ВГБО. Мурманск: Поморная правда, 1991. Т. 2. С. 208–209.
 20. Семенова Л.А., Алексюк В.А. Зоопланктон Нижней Оби // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2010. № 10. С. 156–169.
 21. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. 2011 год. СПб. : ART-Xpress, 2012.
 22. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in algae, phytoplankton and higher plants // Physiol. Pflanz. 1975. Vol. 167, № 2. P. 191–195.
 23. Митрофанова Е.Ю. Фитопланктон р. Оби как индикатор качества ее вод // Экология пойм сибирских рек и Арктики. Новосибирск, 1999. С. 57–62.
 24. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1, вып. 10. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 492 с.
 25. Котовщиков А.В., Кириллова Т.В. Сезонная динамика пигментных характеристик фитопланктона разнотипных рек бассейна Верхней Оби // Проблемы региональной экологии. 2008. № 6. С. 72–77.
 26. Mitrofanova E.Y. Seasonal patterns of potamoplankton in a large lowland river of temperate zone (Upper Ob as a case study, Russia) // International Journal of Environmental Research. 2015. Т. 9, № 2. PP. 697–710.

27. Люцигер А.О. Аномальный паводок 2014 года на Алтае // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: Тр. Всерос. науч. конф. с междунар. уч.: в 2 т. Барнаул, 2014. Т. 1. С. 118–129.
28. Sellers T., Bukaveckas P.A. Phytoplankton production in a large, regulated river: A modeling and mass balance assessment // *Limnol. Oceanogr.* 2003. № 48(4). PP. 1476–1487.
29. Desortová B., Puncochár P. Variability of phytoplankton biomass in a lowland river: Response to climate conditions // *Limnologica.* 2011. № 41. P. 160–166.
30. Kotovshchikov A.V., Dolmatova L.A. Dynamics of Chlorophyll a Content in the Ob River and its Relationship with Abiotic Factors // *Inland Water Biology.* 2018. Vol. 11, № 1. PP. 21–28.
31. Науменко Ю.В. Сток фитопланктона Средней Оби // *Сибирский биологический журнал.* 1992. Вып. 6. С. 30–35.
32. Чайковская Т.С. Динамика и сток фитопланктона Енисея ниже Красноярского водохранилища в первые три года его заполнения // *Растительные богатства Сибири. Новосибирск : Наука, 1971. С. 277–286.*

References

1. Muraveyskiy SD. Reki i ozero: gidrobiologiya, stok [Rivers and lakes: hydrobiology, flow]. Moscow: Gos. izd-vo geogr. literatury; 1960. 388 p. In Russian
2. Wheeler JD, Secchi E, Rusconi R, Stocker R. Not Just Going with the Flow: The Effects of Fluid Flow on Bacteria and Plankton. *Annual Review of Cell and Developmental Biology.* 2019;35(1):1-25. doi: 10.1146/annurev-cellbio-100818-125119
3. Siberian River Run-off in the Kara Sea: Characterisation, Quantification, Variability and Environmental Significance. Stein R, Fahl K, Fütterer DK, Galimov EM and Stepanets OV, editors. Amsterdam; 2003. 488 p.
4. Malone TC, Crocker LH, Pike SE., Wendler BW. Influences of river flow on the dynamics of phytoplankton production in a partially stratified estuary. *Marine Ecology – Prog. Ser.* 1988;48:235-249.
5. Chase Z., Strutton PG., Hales B. Iron links river runoff and shelf width to phytoplankton biomass along the U.S. West Coast. *Geophysical research letters.* 2007;34:L04607
6. Shulkin VM, Orlova TYu, Shevchenko OG, Stonik IV. The effect of river runoff and phytoplankton production on the seasonal variation of the chemical composition of coastal waters of the Amursky Bay, Sea of Japan. *Russian Journal of Marine Biology.* 2013;39(3):197-207.
7. Dokulil MT, Donabaum U. Phytoplankton of the Danube River: Composition and Long-Term Dynamics. *Acta zoologica Bulgarica.* 2014;7:147-152.
8. Fulton RS, Hendrickson JC. Appendix 8.A. Relationships of Water Flows with Plankton and Water Quality. Palatka, Florida; 2011. 16 p.
9. Shawn MG, Gretchen G. Environmental factors controlling phytoplankton dynamics in a large floodplain river with emphasis on cyanobacteria. *River Research and Applications.* 2020;36(3). doi: 10.1002/rra.3658
10. Solonevskaya AV. Dinamika sezonnoho razvitiya i stok fitoplanktona Verkhney Obi na uchastke g. Kamen' – s. Dubrovino [Dynamics of seasonal development and runoff of phytoplankton in the Upper Ob in the area between the town of Kamen and the village. Dubrovino. Vodorosli i griby Zapadnoy Sibiri. Ch. 1.: Tr. TsSBS. Vyp. 8. Novosibirsk; 1964. pp. 69-81. In Russian
11. Solonevskaya AV. Stok fitoplanktona Verkhney Obi za 1963 g. [Phytoplankton runoff in the Upper Ob for 1963]. Vodorosli i griby Zapadnoy Sibiri. Novosibirsk: Nauka; 1965. Ch. 2. pp. 16-23. In Russian
12. Solonevskaya AV. Stok fitoplanktona Nizhney Obi [Phytoplankton runoff in the Lower Ob]. Hidrostroytel'stvo i rybnoe khozyaystvo v Nizhney Obi. Tyumen: Izd-vo SibNIIRH; 1966. pp. 77-91. In Russian

13. Semenova LA, Leleko TI, Alekseyuk VA. Stok planktona Nizhney Obi [Plankton runoff of the Lower Ob]. *Izuchenie reki Obi i ee pritokov v svyazi s khozyaystvennym osvoeniem Zapadnoy Sibiri*. L.: Izd-vo Rosrybkhhoz; 1989:305. pp. 56-65. In Russian
14. Chaykovskaya TS. Fitoplankton i saprobiologicheskaya otsenka kachestva vod r. Uryup i ee pritokov [Phytoplankton and saprobiological assessment of water quality of the Uryup River and its tributaries]. *Kompleksnyye issledovaniya vodnykh resursov Sibiri*: tr. Zap.-Sib. region NII; 56. M.: Gidrometeoizdat; 1983. pp. 131-137. In Russian
15. Roll YV, Markovskiy YM. Planktostok srednego Dnepra v svyazi s prognozom budushchego Kremenchugskogo vodokhranilishcha [Plankton runoff in the middle Dnieper in connection with the forecast for the future of the Kremenchug reservoir]. *Zool. zhurn.*; 1955;34(3):506-517. In Russian
16. Kuznetsova AA. Dinamika i stok fitoplanktona r. Volgi v rayone g. Kuybysheva [Dynamics and runoff of phytoplankton of the Volga River in the area of the city of Kuibyshev]. Tr. problemnykh i tematicheskikh soveshchaniy. Vol. 7. *Problemy gidrobiologii vnutrennikh vod*; 1957;3. pp. 108-110. In Russian
17. Krokhalievskaya NG, Alekseyuk VA, Semenova LA. Vidovoy sostav zooplanktona vodoemov Nizhney Obi [Species composition of zooplankton in water bodies of the Lower Ob]. *Rybnoe khozyaystvo na vodoemakh Zapadnoy Sibiri*. L.: GosNIORH; 1981;171. pp. 100-105. In Russian
18. Krokhalievskaya NG, Alekseyuk VA. Zooplankton, ego produktsiya i stok biomassy v nizhnem techenii Obi [Zooplankton, its production and biomass runoff in the lower reaches of the Ob]. *Biologiya i ekologiya gidrobiontov ekosistemy Nizhney Obi*. Sverdlovsk: Izd-vo UNT AN SSSR; 1983. pp. 3-11. In Russian
19. Semenova LA, Leleko TI, Alekseyuk VA. Mnogoletnie issledovaniya stoka vodorosley i zooplanktona Nizhney Obi [Long-term studies of algae and zooplankton runoff in the Lower Ob]. *Tez. dokl. VI s"ezda VGBO*. Murmansk: Pomornaya Pravda; 1991; 2. pp. 208-209. In Russian
20. Semenova LA, Alekseyuk VA. Zooplankton Nizhney Obi [Zooplankton of the Lower Ob]. *Vestnik ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya*. 2010;10:156-169.
21. Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispol'zovanie i kachestvo [Surface and groundwater resources, their use and quality]. SPb: ART-Xpress; 2012. 170 p.
22. Jeffry SW, Humphrey GF. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in algae, phytoplankton and higher plants. *Physiol. Pflanz*. 1975;167(2):191-195.
23. Mitrofanova EY. Fitoplankton r. Obi kak indikator kachestva ee vod [Phytoplankton river Ob as an indicator of the quality of its waters]. *Ekologiya poym sibirskikh rek i Arktiki*. Novosibirsk; 1999. pp. 57-62. In Russian
24. Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi [Water cadastre. Long-term data on the regime and resources of land surface waters]. L.: Gidrometeoizdat; 1984. 492 p. In Russian
25. Kotovshchikov AV, Kirillova TV. Sezonnaya dinamika pigmentnykh harakteristik fitoplanktona raznotipnykh rek basseyna Verkhney Obi [Seasonal dynamics of pigment characteristics of phytoplankton of different types of rivers in the Upper Ob basin]. *Problemy regional'noy ekologii*. 2008;6:72-77. In Russian
26. Mitrofanova EY. Seasonal patterns of potamoplankton in a large lowland river of temperate zone (Upper Ob as a case study, Russia). *International Journal of Environmental Research*. 2015;9(2):697-710.
27. Lyutsiger AO. Anomal'nyy pavodok 2014 goda na Altae [Anomalous flood of 2014 in Altai]. *Vodnye i ekologicheskie problemy Sibiri i Tsentral'noy Azii*: tr. Vseross. nauch. konf. s mezhdunar. uch. Barnaul; 2014;2(1):118-129. In Russian
28. Sellers T, Bukaveckas PA. Phytoplankton production in a large, regulated river: A modeling and mass balance assessment. *Limnol. Oceanogr*. 2003;48(4):1476-1487.
29. Desortová B, Puncochár P. Variability of phytoplankton biomass in a lowland river: Response to climate conditions. *Limnologica*. 2011;41:160-166.

30. Kotovshchikov AV, Dolmatova LA. Dynamics of chlorophyll a content in the Ob River and its relationship with abiotic factors. *Inland Water Biology*. 2018;11(1):21-28. In Russian, English summary
31. Naumenko YuV. Stok fitoplanktona Sredney Obi [Phytoplankton runoff in the middle Ob]. *Sibirskiy biologicheskiy zhurnal*. 1992;6:30-35.
32. Chaykovskaya TS. Dinamika i stok fitoplanktona Eniseya nizhe Krasnoyarskogo vodokhranilishcha v pervye tri goda ego zapolneniya [Dynamics and runoff of Yenisei phytoplankton below the Krasnoyarsk reservoir in the first three years of its filling]. *Rastitel'nye bogatstva Sibiri*. Novosibirsk: Nauka; 1971. PP. 277-286.

Информация об авторах:

Котовщиков Антон Викторович – старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (Барнаул, Россия)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8427-3329>

E-mail: kotovschik@iwep.ru

Бурмистрова Ольга Сергеевна – научный сотрудник лаборатории гидробиологии Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (Барнаул, Россия)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3256-9766>

E-mail: burmolga@yandex.ru

Дьяченко Александр Владимирович – научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (Барнаул, Россия)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4178-8415>

E-mail: dychenko@iwep.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Anton V. Kotovshchikov, senior researcher at the Laboratory of Hydrobiology, Institute of Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8427-3329>

E-mail: kotovschik@iwep.ru

Olga S. Burmistrova, researcher at the Laboratory of Hydrobiology of the Institute of Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3256-9766>

E-mail: burmolga@yandex.ru

Alexander V. Dyachenko, researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, Institute of Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4178-8415>

E-mail: dychenko@iwep.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 14.03.2023;
одобрена после рецензирования 29.06.2023; принята к публикации 18.03.2024.*

*The article was submitted 14.03.2023;
approved after reviewing 29.06.2023; accepted for publication 18.03.2024.*