

Фитопланктонные сообщества реки Вычегда в зоне поступления очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного производства

Е. Н. ПАТОВА¹, А. С. СЕНИНА¹, Ю. Н. ШАБАЛИНА², И. Н. СТЕРЛЯГОВА¹

¹Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
167982, Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, 28
E-mail: patova@ib.komisc.ru

²Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина
167001, Сыктывкар, Октябрьский пр., 55

Статья поступила 03.05.2021

После доработки 21.05.2021

Принята к печати 24.05.2021

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследования летнего фитопланктона (июль 2018–2020 гг.) в среднем течении р. Вычегда в местах сброса очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного комбината АО “Монди Сыктывкарский ЛПК” (АО “Монди СЛПК”). В фитопланктоне исследованного участка реки выявлено 263 вида с разновидностями водорослей из семи отделов: Cyanoprokaryota – 8, Ochrophyta – 4, Rhodophyta – 1, Euglenophyta – 1, Bacillariophyta – 232, Chlorophyta – 15, Charophyta – 2. Преобладают по разнообразию в основном широко распространенные эвритопные виды. За три года исследований для фитопланктонных сообществ показана стабильность комплекса доминирующих видов и структурного разнообразия. Основу доминирующих комплексов формируют виды из родов *Aulacoseira*, *Dolichospermum*, *Pandorina*, *Eudorina*, *Closterium* и др. Состав доминантов сходен для условно фоновых пунктов и зоны сброса сточных вод. Ниже участка сброса сточных вод с очистных сооружений АО “Монди СЛПК” отмечено массовое развитие теплолюбивого вида диатомеи *Diadmesmis confervacea* – индикатора теплового загрязнения. Общая численность фитопланктона в реке на исследованных станциях колеблется в диапазоне от 1150 до 18000 тыс. кл/дм³, биомасса – от 0,01 до 0,29 мг/дм³. Соотношение общей численности и биомассы водорослей фитопланктона и виды-индикаторы, формирующие комплекс доминантов, отражают повышение трофического статуса вод обследованных участков и высокую степень антропогенной нагрузки на экосистему р. Вычегда. На основе альгоиндикации воды условно фоновых и принимающих сточные воды пунктов наблюдения отнесены к III классу качества (с разрядом качества 3б – “слабо загрязненная”).

Ключевые слова: разнообразие и количественные показатели фитопланктона, сточные воды целлюлозно-бумажного производства, река Вычегда, северо-восток Европейской России.

В результате работы объектов целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) образуется значительный объем сточных вод, которые даже после очистки могут содержать органические и неорганические загрязнители

водной среды разной степени токсичности [Боголицын и др., 2010; Израэль и др., 2011; Штамм и др., 2015]. Поступление больших объемов сточных вод ЦБП в водные экосистемы приводит к созданию условий, неред-

ко принципиально отличающихся от водоемов данного региона по гидрологическому и тепловому режиму, трансформации физико-химических параметров водной среды, что оказывает негативное влияние на биоразнообразие и структуру сообществ гидробионтов [Amblard et al., 1990; Максименко и др., 2000; Hall, Landis, 2009; Madan et al., 2018].

Водоросли фитопланктона благодаря способности к фотосинтезу являются продуцентами органических веществ, что определяет их существенную роль в пищевых цепях биогеоценозов различных водоемов. Ввиду стенопности многих видов и высокой чувствительности к условиям окружающей среды водоросли активно применяют в биологическом анализе качества водной среды [Барина и др., 2006]. Исследования этой группы фототрофных организмов помогают выявить экологические особенности водных объектов, оценить степень их загрязнения и трансформации, а также контролировать качество вод [Sládeček, 1973, 1986; Барина и др., 2006].

Исследование воздействия стоков целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК) показало, что сбросы сточных вод предприятий нередко приводят к обеднению видового состава водорослей и даже их гибели [Ленова, Ступина, 1990; Tarlan et al., 2002; Negi, Rajput, 2013; Madan et al., 2018]. Может также происходить массовое развитие отдельных видов, устойчивых к длительному воздействию токсических веществ [Gentili, 2014]. Например, “цветение” водорослей рода *Spirogyra* отмечено в оз. Байкал в зоне воздействия ООО “ЛПК “СЕВЛЕС”, г. Северобайкальск [Timoshkin et al., 2015]. Для рек Европейского Севера исследование влияния сбросов сточных вод ЦБК на фитопланктон проведено для дельты р. Северной Двины, в зоне сброса сточных вод Архангельского ЦБК [Змётная, Новикова, 2015]. Для р. Вычегда выполнен анализ сезонных изменений биомасс фитопланктона в зоне рассеивающего выпуска сточных вод ЦБК АО “Монди Сыктывкарский ЛПК” (АО “Монди СЛПК”) [Мискевич, Самохина, 2019]. Сведения о видовом составе и структуре фитопланктона р. Вычегда в зоне поступления сточных вод отсутствуют.

В 2018–2020 гг. в рамках соглашения между Институтом биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской ака-

демии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) и АО “Монди СЛПК” выполнены комплексные исследования по оценке влияния деятельности целлюлозно-бумажного комбината на биологическое разнообразие наземных и водных экосистем в зоне его воздействия. Для оценки степени трансформации биоразнообразия водной экосистемы р. Вычегда, принимающей стоки этого предприятия, исследованы сообщества гидробионтов.

Цель настоящей работы – оценить изменение разнообразия и количественных показателей фитопланктона р. Вычегда в зонах сброса очищенных сточных вод ЦБК АО “Монди СЛПК”, на основе альгологических показателей дать оценку качества водной среды.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Пробы фитопланктона собирали в среднем течении р. Вычегда в июле 2018–2020 гг. Подробное описание района исследований, карта-схема с пунктами отбора проб и их характеристики, а также результаты гидрохимического анализа вод р. Вычегда приведены в работе Е. Н. Патовой с соавт. [Патова и др., 2021]. Отбор проб фитопланктона проведен в пунктах/станциях I, IV, V, VI. В пунктах I и IV пробы фитопланктона отбирали с левого берега в местах сброса очищенных сточных вод, поступающих с очистных сооружений АО “Монди СЛПК”. Они обозначены как I_L (идет малый сброс условно очищенных производственных сточных вод) и IV_L (основной выпуск очищенных сточных вод с внеплощадных очистных сооружений АО “Монди СЛПК”, принимающих подогретые производственные стоки и коммунально-бытовые стоки города). Пробы с противоположного правого берега, собранные в правобережной рипали, – пункты I_R и IV_R, расположены выше по течению реки, и, как показали результаты гидрохимического анализа, не испытывают воздействия сточных вод. Сборы с этих участков нами отнесены к условно фоновым. Пункты наблюдений V и VI расположены ниже по течению реки, на значительном удалении (более 10 км) от мест сброса сточных вод, их мы также рассматривали как условно фоновые. Следует отметить, что в районе пункта IV_L начинается и у пункта VI заканчивается влияние тепло-

вого загрязнения сточных вод на р. Вычегда [Елсаков, Щанов, 2016; Патова и др., 2021].

Период исследований 2018–2020 гг. характеризовался контрастными погодными условиями, отразившимися и на температурном режиме, и гидрологических показателях р. Вычегда. В период исследований 2018 и 2019 гг. отмечен высокий уровень воды в межень, а 2020 г. был маловодным, что оказало влияние на концентрацию ряда загрязняющих веществ в воде [Патова и др., 2021].

Отбор проб воды для исследования фитопланктона объемом 50–100 л осуществляли из поверхностных горизонтов, концентрировали пробу с помощью планктонной сети (использован мельничный газ № 77) [Методика..., 1975]. Изучали живые и фиксированные раствором формальдегида (4 %) пробы. Для определения водорослей использовали микроскопы Nikon Eclipse80i (оборудован системой дифференциального интерференционного контраста и видеофиксации изображений) (Япония) и Биолам-И (Россия). Определение диатомовых выполняли во временных, прокаленных и постоянных препаратах, приготовленных с использованием среды Эльяшева [Диатомовые водоросли..., 1974, 1992; Методика..., 1975]. Для идентификации водорослей использовали основные отечественные и зарубежные определители. Учет численности и биомассы выполнен методом прямого счета клеток с использованием камеры Горяева [Методика..., 1975; Руководство..., 1983], для каждого пункта рассчитывали среднее значение и стандартное отклонение из пяти повторностей. К доминантам относили первые три вида (в случае одинаковых значений до 5) в ранжированном ряду численностей / биомасс, к субдоминантам – следующие три (четыре) вида.

Расчет сапробности водной среды проведен на основе полуколичественного метода оценки обилия диатомовых водорослей по девятибалльной шкале, исходя из относительного (процентного) обилия отдельных таксонов [Руководство..., 1983]. Шкала: 1 балл – число экземпляров менее 1 % от общего количества подсчитанных; 2 балла – число экземпляров составляет 2–3 %; 3 балла – 4–10 %; 5 баллов – 11–20 %; 7 баллов – 21–40 %; 9 баллов – 41–100 %. Индекс сапробности воды рассчитан по Пантле – Букку в модификации Сладечека [Руководство..., 1983]: $S = \Sigma hs / \Sigma h$,

где S – индекс сапробности; s – сапробная валентность видов [Sládeček, 1973], Σh – сумма баллов по девятибалльной шкале.

Для оценки видового сходства сообществ фитопланктона на исследованных станциях использован коэффициент Серенсена – Чекановского, рассчитанный с использованием Excel надстройки – ExStatR [Новаковский, 2016]. В анализе структуры фитопланктонного сообщества применяли индексы видовой разнообразия Шеннона – Уивера, эквитабельности, Шелдона и Бергера – Паркера [Песенко, 1982].

Экологические характеристики видов приведены по литературным данным [Lowe, 1974; van Dam et al., 1994; Баринаева и др., 2006]. Классы качества воды установлены на основе комплексной экологической классификации поверхностных вод [Оксиюк и др., 1993; Алимов, 2000].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего за весь период исследований выявлено 263 таксона (вида с разновидностями) водорослей из семи отделов: цианопрокариоты – 8, охрофитовые – 4, красные – 1, эвгленовые – 1, диатомовые – 232, зеленые – 15, харовые – 2. Список видов (с указанием авторов и категорией устойчивости таксона к органическому загрязнению по Сладечеку) доступен для просмотра на сайте Mendeleev Data [Patova et al., 2021]. За три года исследований на пунктах наблюдений в фитопланктонных сообществах отмечено от 37 до 180 таксонов рангом ниже рода (рис. 1). Максимальное число видов отмечено в пункте VI, минимальное – в пункте IV_R. Наблюдается тенденция увеличения разнообразия водорослей вниз по течению реки (см. рис. 1). На всех исследованных станциях преобладают по разнообразию диатомовые водоросли, существенных изменений в таксономической структуре фитопланктонных сообществ не выявлено (рис. 2).

С 2018 по 2020 г. общая численность фитопланктона в реке на исследованных станциях отмечена в диапазоне от 1150 до 18000 тыс. кл./дм³, биомасса – от 0,01 до 0,29 мг/дм³ (рис. 3). Максимальные количественные показатели численности и биомассы водорослей фитопланктона за три года наблюдений

зафиксированы в 2018 г. По сравнению с фоновыми значениями наиболее высокие количественные показатели водорослей фитопланктона выявлены в местах сброса сточных вод в пунктах I_L и IV_L. Во всех пробах доминируют по численности и биомассе диатомовые водоросли. Среди других таксономических групп относительно высокая численность отмечена для цианопрокариот, зеленых и охрофитовых водорослей. Основу биомассы формируют колониальные и одноклеточные диатомеи, крупноклеточные и нитчатые зеленые водоросли, а также нитчатые цианопрокариоты.

Сравнение видового богатства водорослей фитопланктона на пунктах наблюдений показывает умеренное сходство таксономического состава, на что указывают относительно высокие значения коэффициента Сьеренсена–Чекановского (рис. 4). Ниже приведена краткая характеристика фитопланктонных сообществ обследованных пунктов наблюдений.

Для пункта I_R (условно фоновый) за весь период исследований обнаружено 109 видов водорослей (см. рис. 1) [Patova et al., 2021]. Численность и биомасса фитопланктона были в диапазоне значений, отмеченных для других условно фоновых пунктов исследования (см. рис. 3). Комплекс доминантов из диатомеи формируют *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* и субдоминант *A. italica* (табл. 1). Это

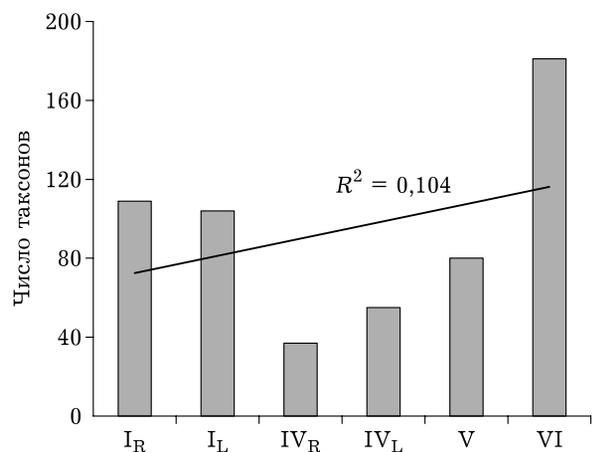


Рис. 1. Флористическое богатство водорослей планктона в обследованных пунктах р. Выгегда (июль 2018–2020 гг.)

индифферентные по отношению к содержанию солей в воде виды, распространенные в нейтральных и слабощелочных водах. В состав доминантных комплексов также входит цианопрокариота *Dolichospermum planctonicum* – вид, способный вызывать “цветение” воды. К субдоминантам можно отнести крупноклеточные зеленые водоросли *Closterium ehrenbergii*, *Pandorina morum* и *Eudorina elegans*, что сказывается на показателях биомассы. Только в этом пункте в летнем планктоне в 2020 г. отмечена с высоким обилием крас-

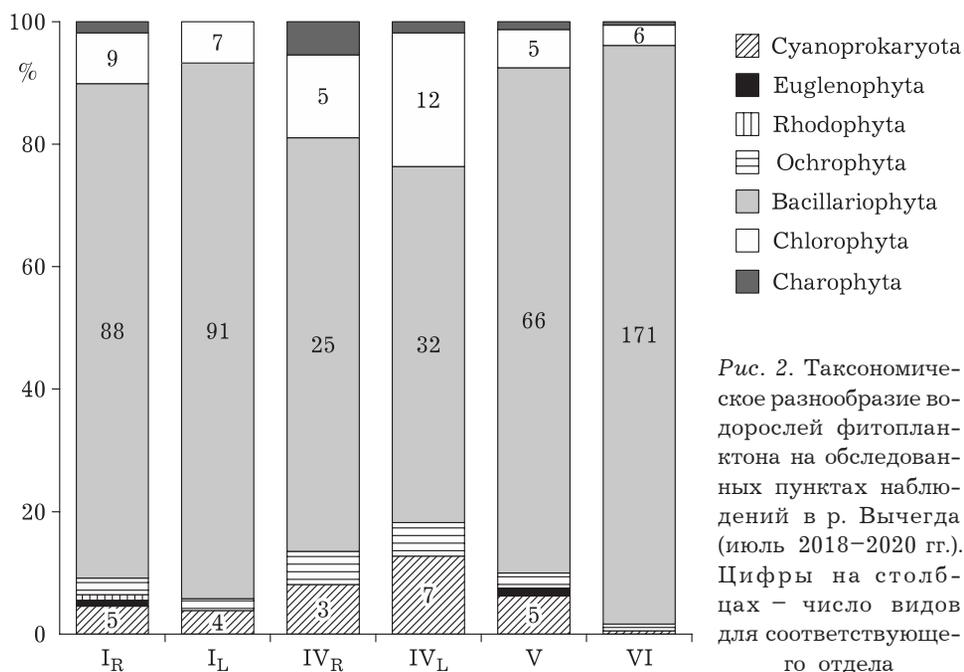


Рис. 2. Таксономическое разнообразие водорослей фитопланктона на обследованных пунктах наблюдений в р. Выгегда (июль 2018–2020 гг.). Цифры на столбцах – число видов для соответствующего отдела

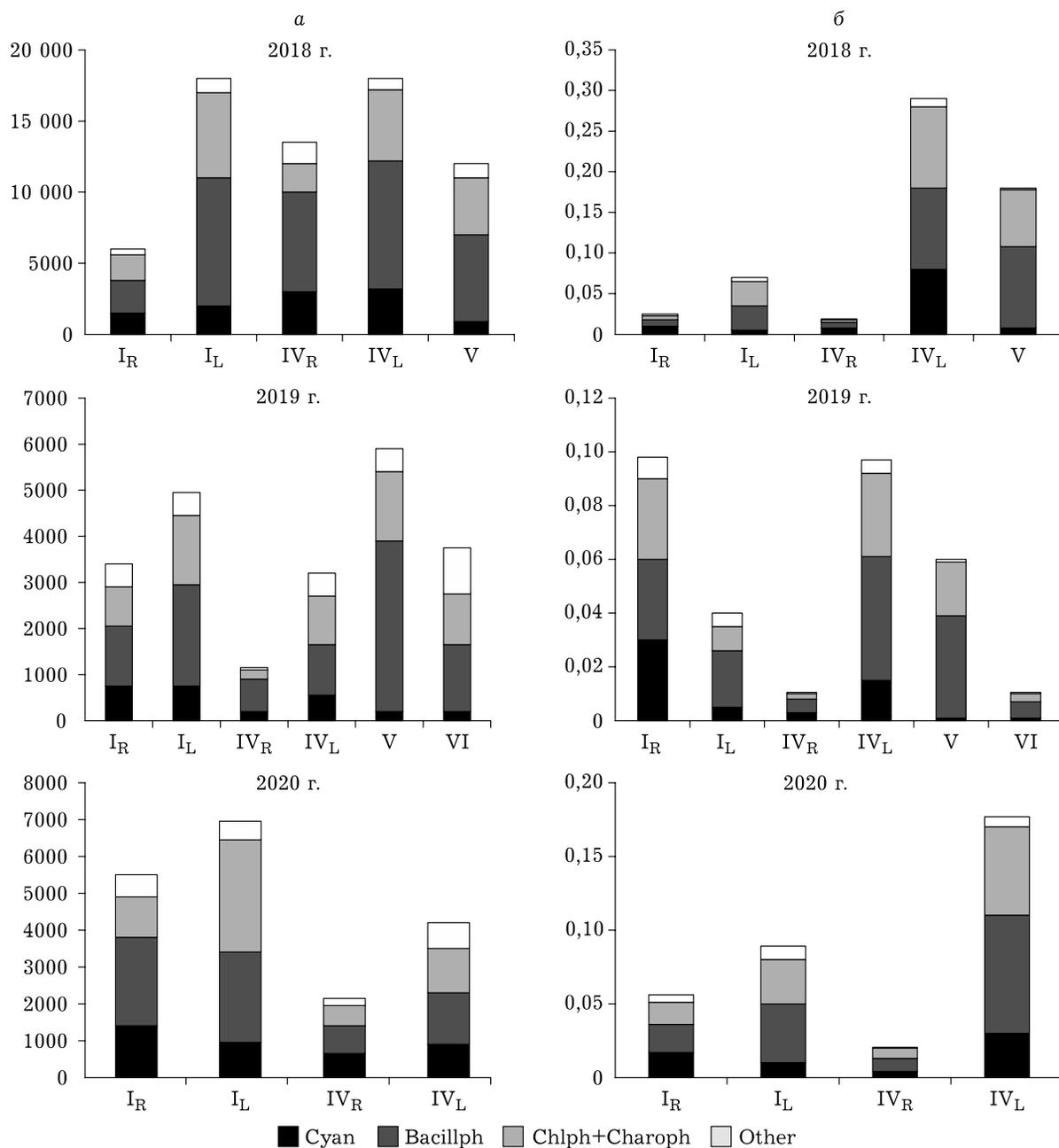


Рис. 3. Количественные показатели фитопланктонных сообществ на исследованных пунктах р. Вычегда (июль 2018–2020 гг.). а – численность водорослей фитопланктона (средние значения, тыс. кл./дм³); б – биомасса водорослей фитопланктона (средние значения, мг/дм³). Cyan – Cyanoprokaryota, Bacillph – Bacillariophyta, Chlph + Charoph – Chlorophyta и Charophyta, Other – остальные отделы

ная водоросль *Audouinella chalybaea*, обитающая в чистых водотоках. Относительно часто в пробах встречали клетки золотистой водоросли *Dinobryon divergens*. Остальные водоросли отмечены с низким обилием.

В пункте I_L (место сброса условно очищенных сточных вод) отмечено 104 вида водорослей, их таксономическое разнообра-

зие относительно условно фоновой станции I_R и других пунктов наблюдений заметно не менялось (см. рис. 2). Максимальное сходство видового состава водорослей для данного пункта наблюдений отмечено с расположенным рядом условно фоновым пунктом I_R (см. рис. 4). Количественные показатели в 2018 и 2020 гг. были выше, чем для условно фо-

нового пункта I_R (см. рис. 3). Комплекс доминантов формируют диатомовые (*Aulacoseira granulata* var. *angustissima*) и зеленые (*Pandorina morum* и *Eudorina elegans*) водоросли (см. табл. 1). Субдоминанты – *Aulacoseira italica*, *Pseudanabaena catenata*, *Pediastrum boryanum*. Только в этом пункте наблюдений обнаружены с большим обилием колонии *Volvox globator* и нити *Palmodictyon viride*.

Фитопланктон в пункте IV_R (условно фоновый) формируют представители 37 таксонов (см. рис. 1) [Patova et al., 2021]. Основу планктонных сообществ, как и на других станциях, образуют диатомовые, зеленые и цианопрокариоты (см. рис. 2). Для данного пункта наблюдений отмечены минимальные показатели численности и биомассы (см. рис. 3). Ди-

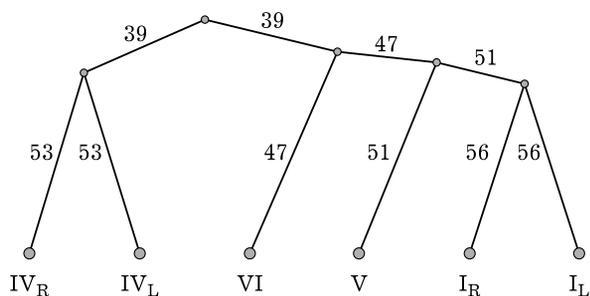


Рис. 4. Кластерный анализ сходства видового состава фитопланктона в обследованных пунктах р. Вычегда на основе коэффициента Серенсена – Чекановского (выполнен методом группировки по среднему арифметическому (UPGMA))

атомовая водоросль *Aulacoseira italica* входит в состав доминантов, *Aulacoseira italica* var. *tenuissima* – субдоминант (см. табл. 1).

Т а б л и ц а 1
Доминирующие виды водорослей в фитопланктоне исследованных пунктов наблюдений р. Вычегда (июль 2018–2020 гг.)

№	Таксон	Сап	рН	Гал	Пункт наблюдений						
					I _R	I _L	IV _R	IV _L	V	VI	
Цианопрокариоты											
1	<i>Anabaena</i> sp.	-	-	-							++
2	<i>Dolichospermum planctonicum</i>	β-o	-	-	++		++		++		
3	<i>Dolichospermum flosaquae</i>	β	-	i			+	++			
4	<i>Pseudanabaena catenata</i>	β-p	-	-		+				++	
Ochrophyta											
5	<i>Dinobryon divergens</i>	o-β	ind	i							+
Bacillariophyta											
6	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	β	alf	-	++	++			+		+
7	<i>Aulacoseira italica</i>	o-β	ind	-	+	+	++	+	++	++	
8	<i>Aulacoseira italica</i> var. <i>tenuissima</i>	β	ind	-			+	++	+	+	
9	<i>Diademesmis confervacea</i> *	x-o	alf	-				++			
Chlorophyta											
10	<i>Comasiella arcuata</i>	o-a									+
11	<i>Eudorina elegans</i>	β	-	i	+	++	+	+			
12	<i>Monoraphidium griffithii</i>	β	-	i							++
13	<i>Monoraphidium contortum</i>	β	-	i				++			
14	<i>Mucidosphaerium pulchellum</i>	β	ind	i				+			
15	<i>Pandorina morum</i>	β	-	i	+	++				++	
16	<i>Tetradesmus obliquus</i>	β-p	-	oh				++			
17	<i>Pediastrum boryanum</i>	o-a	-	oh			+				
18	<i>Volvox globator</i>	o-a	-	-			+				
Charophyta											
19	<i>Closterium ehrenbergii</i>	o-a	ind	hb	+		++	+			

Примечание. Прочерк – сведения не найдены; Сап – категория устойчивости индикаторного таксона к органическому загрязнению по Сладечеку: β-o – бета-олигосапробионт, β – бетамезосапробионт, β-p – бета-полисапробионт, o-β – олиго-бетамезосапробионт, x-o – ксено-олигосапробионт, o-a – олиго-альфамезосапробионт. рН – отношение к активной реакции воды, концентрации протонов: ind – индифферент, alf – алкалофил. Гал – галобность, отношение к концентрации хлоридов в воде: i – индифферент, hb – галофоб, oh – олигогалоб. * – индикатор теплового загрязнения. Степень доминирования: ++ – доминант, + – субдоминант.

Наряду с диатомеями в планктоне развивалось много цианопрокариот, в том числе виды “цветения” воды – *Dolichospermum planctonicum*, *D. flosaquae*. Часто в поле зрения попадали крупноклеточные зеленые водоросли *Closterium ehrenbergii* и *Eudorina elegans*. Только для этого пункта наблюдений отмечены два вида диатомовых водорослей *Pantocsekiella comensis* и *Urosolenia longiseta* – индикаторы олиготрофных условий.

В пункте IV_L (место основного сброса очищенных сточных вод с внеплощадных очистных сооружений) зафиксировано 56 видов (см. рис. 1). Таксономическое разнообразие водорослей относительно условно фоновой станции IV_R выше, увеличивается доля зеленых водорослей и цианопрокариот (см. рис. 2). Это связано с отепляющим эффектом сточных вод и их более высоким трофическим статусом [Патова и др., 2021], что отражается на количественных показателях фитопланктона (см. рис. 3). Наиболее сходен видовой состав водорослей данного пункта наблюдений с условно фоновой станцией IV_R (см. рис. 4). В комплекс доминантов входят: из диатомей – *Aulacoseira italica* var. *tenuissima*, а из субдоминантов – *A. italica* (см. табл. 1). В 2020 г. в пробах планктона отмечено массовое развитие характерного для чистых вод вида *Diademsia confervacea*, приуроченного к тропическим областям и считающегося теплолюбивым. Распространение и массовое развитие *D. confervacea* в реках Европы предложено рассматривать в качестве индикатора теплового загрязнения водоемов [Expansion..., 2015]. Из других отделов к доминантам по количественным показателям отнесены мелкоклеточные зеленые водоросли *Tetrademus obliquus* и *Monoraphidium contortum*, а также цианопрокариота *Dolichospermum flosaquae*. Высокое обилие показали зеленые водоросли *Mucidosphaerium pulchellum*, *Closterium ehrenbergii* и *Eudorina elegans*, а также цианопрокариота *Arhanizomenon flosaquae*. Только в этом пункте наблюдений встречены диатомовые водоросли *Handmannia comta* (α-β-сапробионт) и *Eunotia sudetica* (х-α-сапробионт).

В п. V (расположен на 11,8 км ниже пункта IV_L по течению р. Вычегда) отмечено 80 видов водорослей. Фитопланктонные сообщества наиболее близки по составу и структуре с другими условно фоновыми пунктами (см. рис. 2, 4).

На этой станции в 2018 г. зафиксированы максимальные значения численности и биомассы (см. рис. 3). Комплекс доминантов из диатомей формируют (см. табл. 1) *Aulacoseira italica* и субдоминанты *A. granulata* var. *angustissima*, *A. italica* var. *tenuissima*. К доминантам в этом пункте отбора проб также могут быть отнесены цианопрокариоты *Dolichospermum planctonicum* и *Pseudanabaena catenata*, из зеленых водорослей – *Pandorina morum*. В полях зрения часто отмечали золотистую водоросль *Dinobryon divergens*.

Речной фитопланктон в п. VI (расположен на расстоянии 5,5 км от п. V, конец зоны воздействия теплового загрязнения сточными водами) формируют 181 вид (см. рис. 1) [Patova et al., 2021]. В таксономической структуре преобладают диатомовые водоросли (рис. 2), по видовому составу они группируются с фитопланктонными сообществами других условно фоновых пунктов (см. рис. 4). Численность и биомасса водорослей ниже, чем в п. V (см. рис. 3). Комплекс доминантов из диатомей остается неизменным (см. табл. 1): доминант – *Aulacoseira italica*, субдоминанты – *A. granulata* var. *angustissima*, *A. italica* var. *tenuissima*. К доминантам на этом участке также могут быть отнесены цианопрокариота *Anabaena* sp., из зеленых водорослей – *Monoraphidium griffithii*. В комплекс субдоминантов входят зеленая водоросль *Comasiella arcuata* и золотистая – *Dinobryon divergens*.

Структурное (видовое) разнообразие отражает степень развития видов, уровень доминирования ведущих групп и связанную с ним выравненность видов в сообществах [Песенко, 1982]. Именно эти показатели позволяют оценить различие комплексов водорослей на разных пунктах наблюдений в реке. Из табл. 2 видно, что диапазоны значений большинства индексов разнообразия для пунктов наблюдения заметно не отличаются. Более высокое α-разнообразие и выравненность видов отмечены в местах сброса сточных вод в пунктах I_L и IV_L.

Рассчитанные индексы сапробности по диатомовым водорослям варьируют по пунктам наблюдений в диапазоне: I_R – 1,90–2,06, I_L – 1,97–2,27, IV_R – 1,77–1,90, IV_L – 1,99–2,09, V – 1,88–1,96, VI – 1,77–2,01. Полученные значения соответствуют III классу качества воды, или β-мезосапробной зоне с разря-

Диапазон значений индексов разнообразия водорослей фитопланктона по разным пунктам наблюдений р. Вычегда (июль 2018–2020 гг.)

Индекс		Пункт наблюдений					
		I _R	I _L	IV _R	IV _L	V	VI
E	Эквитабельность	0,46–0,70	0,59–0,74	0,56–0,74	0,60–0,75	0,58–0,75	0,75
H	Шеннона – Уивера	0,59–0,94	0,85–1,05	0,80–0,83	0,82–0,95	0,58–0,81	0,93
SH	Шелдона	1,82–2,55	2,86–3,29	2,22–2,40	2,28–2,60	2,24–2,25	2,30
B-P	Бергера – Паркера	1,64–3,65	2,55–2,95	2,14–2,70	2,55–3,44	2,35–2,63	2,80

П р и м е ч а н и е. Для пунктов I и IV – за три года наблюдений; V – за 2018–2019 гг., VI – за 2019 г.

дом качества – “слабо загрязненная” [Оксиюк и др., 1993]. Диапазон полученных количественных показателей также соответствует значениям, характерным для мезотрофных водоемов с 3-м классом качества вод [Алимов, 2000].

ОБСУЖДЕНИЕ

В фитопланктонных сообществах исследованного участка р. Вычегда выявлено 263 таксона (виды с разновидностями) водорослей из семи отделов. Преобладают по разнообразию диатомовые водоросли, что характерно для северных рек [Гецен, 1985; Змётная, Новикова, 2015; Габышев, Габышева, 2018] и для р. Вычегда в частности [Кордэ, 1959; Патова и др., 2018]. Превалируют по разнообразию в основном широко распространенные эвритопные виды. Большинство выявленных видов относится к бентическим формам, попадающим в планктон из бентоса и перифитона. Показатели видового богатства водорослей (см. рис. 1) и индексы разнообразия (см. табл. 2) варьируют по пунктам наблюдений в зависимости от степени антропогенной нагрузки на обследованных участках р. Вычегда. Отмечена тенденция увеличения разнообразия водорослей фитопланктона по профилю реки (см. рис. 1), что связано не только с увеличением поступления биогенных элементов со сточными водами, но и общим повышением трофического статуса вод р. Вычегда в среднем течении [Патова и др., 2021]. Во всех пробах доминируют по численности и биомассе диатомовые и зеленые водоросли, а также цианопрокариоты. Полученные значения указывают на относительно высокое развитие фитопланктона на исследованном участке р. Вычегда [Проблемы..., 1992]. Суще-

ственных изменений в количественных показателях за период наблюдений не выявлено (см. рис. 3), но наблюдается рост численности и биомассы фитопланктона в местах сброса сточных вод в пунктах I_L и IV_L, особенно эта разница заметна в маловодном 2020 г. Полученные нами величины сопоставимы с данными для фитопланктонных сообществ фоновых и загрязненных участков среднего течения р. Вычегда за последнее десятилетие [Патова и др., 2018; Мискевич, Самохина, 2019] и выше величин, зарегистрированных в 50-е годы прошлого столетия [Кордэ, 1959]. Изменение количественных показателей фитопланктона указывает на рост трофического статуса вод р. Вычегда в условиях усиливающейся антропогенной нагрузки.

За три года исследований для фитопланктонных сообществ отмечена стабильность комплекса доминирующих видов и структурного разнообразия. Основу доминирующих комплексов формируют виды из родов *Aulacoseira*, *Dolichospermum*, *Pandorina*, *Eudorina*, *Closterium* и др. Их состав практически одинаков на разных пунктах наблюдений, за исключением участка реки ниже сброса подогретых сточных вод. Здесь в 2020 г. в период малой воды [Патова и др., 2021] отмечено массовое развитие диатомеи *Diadlesmis confervacea* – индикатора теплового загрязнения.

Выявленные нами флористический состав и комплекс доминантов водорослей в бассейне р. Вычегда в основном схожи с таковыми в реках Печоре, Северной Двине, Енисей и ряде других крупных северных водотоков [Еникева, 1983; Гецен, 1985; Пономарева, Щур, 2014; Змётная, Новикова, 2015; Габышев, Габышева, 2018]. Для дельты р. Северной Двины в условиях поступления сточных вод Архангельского ЦБК отмечены главенствующие

позиции диатомей *Melosira granulata* (*Aulacoseira granulata*), *Asterionella formosa*, *Lindavia comta*, *Fragilaria crotonensis* (виды-показатели мезосапробных условий) и значительное развитие зеленой водоросли *Scenedesmus quadricauda* [Змётная, Новикова, 2015]. В составе доминантов р. Вычегда в месте сброса сточных вод, обогащенных соединениями фосфора и азота, также наблюдалось интенсивное развитие мелкоклеточных зеленых водорослей *Tetradesmus obliquus* и *Monoraphidium contortum*. Известно, что многие представители Scenedesmaceae и Selenastraceae устойчивы к длительному воздействию токсических веществ и активно развиваются в богатых биогенными элементами водах [Tarlan et al., 2002; Gentili, 2014], в том числе они являются обитателями активного ила очистных сооружений ЦБК [Щемелинина и др., 2015; Madan et al., 2018].

Индексы сапробности и класс качества вод для исследованных пунктов наблюдений, рассчитанные по диатомовым водорослям, в основном соответствуют показателям, полученным на основе анализа гидрохимии и индикаторных групп зоопланктона и зообентоса [Патова и др., 2021; Батурина и др., 2021]. Следует отметить, что сообщества гидробионтов более чутко реагируют на поступление загрязняющих веществ в отличие от гидрохимических показателей. Для всех пунктов наблюдений на основе альгоиндикации отмечено умеренное загрязнение вод легко окисляемыми органическими веществами, очищенные стоки АО “Монди СЛПК” лишь незначительно повышают трофический статус вод р. Вычегда в зонах их сброса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что в зоне сброса очищенных сточных вод ЦБК АО “Монди СЛПК” отмечено высокое разнообразие водорослей фитопланктона. Всего выявлено 263 вида с разновидностями из семи отделов, основу видового разнообразия формируют диатомовые водоросли. Характеристики фитопланктонных сообществ отражают экологические условия мест их сбора и степень антропогенной нагрузки. Изменение разнообразия фитопланктонных сообществ происходит под влиянием комплекса естественных

и антропогенных факторов: повышение температуры под влиянием сточных вод и поступление с ними загрязняющих веществ. Общая численность фитопланктона в реке на исследованных станциях отмечена в диапазоне от 1150 до 18000 тыс. кл/дм³, биомасса – от 0,01 до 0,29 мг/дм³. Существенных изменений в видовом разнообразии, комплексе доминантов, количественных показателей и распределения водорослей на условно фоновых и загрязненных сточными водами участках р. Вычегда не выявлено. На основе альгологических показателей воды в пунктах обследования отнесены к III классу качества (с разрядом качества ЗБ – “слабо загрязненная”).

Исследование выполнено в рамках темы Государственного задания № АААА-А19-119011790022-1 и при финансовой поддержке проекта “Оценка долговременного влияния АО “Монди СЛПК” (договор № 45-2018/180405). Авторы статьи признательны сотруднику ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН с. н. с. М. А. Батуриной за помощь при сборе проб фитопланктона.

ЛИТЕРАТУРА

- Алимов А. Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука. СПб. отд-ние, 2000. 147 с.
- Баранова С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Изд-во Pilies Studio, 2006. 498 с.
- Батурина М. А., Фефилова Е. Б., Лоскутова О. А. Состояние бентосных сообществ р. Вычегда в условиях влияния очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Сиб. экол. журн. 2021. Т. 28, наст. вып. С. 725–736. doi: 10.15372/SEJ20210604 [Baturina M. A., Fefilova E. B., Loskutova O. A. State of benthic communities of Vychehda River under influence of treated wastewater from pulp and paper industry // Contemporary Problems of Ecology. 2021. Vol. 14, N 6].
- Боголицын К. Г., Соболева Т. В., Гусакова М. А. Научные основы эколого-аналитического контроля промышленных сточных вод ЦБП. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2010. 168 с.
- Габышев В. А., Габышева О. И. Фитопланктон крупных рек Якутии и сопредельных территорий Восточной Сибири. Новосибирск: Изд-во АНС “СибАК”, 2018. 414 с.
- Гецен М. В. Водоросли в экосистемах Крайнего Севера (на примере Большеземельской тундры). Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1985. 165 с.
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1974. Т. 1. 403 с.
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 2, вып. 2 / отв. ред. И. В. Макарова. СПб.: Наука. СПб. отд-ние, 1992. 125 с.
- Елсаков В. В., Щанов В. М. Спутниковые методы в анализе изменений экосистем бассейна р. Вычегда // Со-

- врем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 4. С. 135–145.
- Еникеева Т. В. К оценке сапробности р. Печоры по фитопланктону // Водоёмы бассейнов Печоры и Вычегды. Сыктывкар, 1983. С. 5–9.
- Змётная М. И., Новикова Ю. В. Современное состояние фитопланктонного сообщества и качество поверхностных вод дельты р. Северной Двины // Вестн. Сев. (Арктического) федерал. ун-та. Сер. Естественные науки. 2015. № 4. С. 44–55.
- Израэль Ю. А., Черногаева Г. М., Егоров В. И., Зеленов А. С., Пешков Ю. В. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2010 год. М.: Росгидромет, 2011. 188 с.
- Кордэ Н. В. Количественный планктон реки Вычегды // Изв. Коми фил. ВГО. 1959. Вып. 5. С. 111–120.
- Ленова Л. И., Ступина В. В. Водоросли в доочистке сточных вод / Отв. ред. С. П. Вассер. Киев: Наук. думка, 1990. 184 с.
- Максименко П. Ю., Скурлатов Ю. И., Козлов Ю. П., Фрог Б. Н., Штамм Е. В., Козлова Н. Б. Вероятная роль серосодержащих соединений в формировании токсических свойств сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Вестн. РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2000. № 4. С. 63–70.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоёмов. М.: Наука, 1975. 240 с.
- Мискевич И. В., Самохина Л. А. О некоторых особенностях сезонной динамики гидробиологических процессов на равнинных водотоках на примере реки Вычегды // Вестн. соврем. исследований. 2019. Вып. 3–11 (30). С. 124–130.
- Новаковский А. Б. Взаимодействие Excel и статистического пакета R для обработки данных в экологии // Вестн. Ин-та биологии Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 3. С. 26–33.
- Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Брагинский П. Н., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.
- Патова Е. Н., Кондратёнок Б. М., Сивков М. Д., Кострова С. Н. Качество вод р. Вычегда в условиях поступления очищенных сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Сиб. экол. журн. 2021. Т. 28, наст. вып. С. 696–714. doi: 10.15372/SEJ20210602 [Patova E. N., Kondratenok B. M., Sivkov M. D., Kostrova S. N. Water quality of the Vychegda River under the conditions of the receipt of treated wastewater from the pulp and paper industry // Contemporary Problems of Ecology. 2021. Vol. 14, N 6].
- Патова Е. Н., Стенина А. С., Стерлягова И. Н., Рябова Е. А. Фитопланктон водных объектов бассейна р. Вычегды // Биология внутр. вод. 2018. Т. 11, № 2. С. 11–19. [Patova E. N., Stenina A. S., Sterlyagova I. N., Ryabova E. A. Phytoplankton in water objects of the Vychegda river basin // Inland Water Biol. 2018. Vol. 11, N 2. P. 136–144].
- Песенко Ю. А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 288 с.
- Пономарева Ю. А., Щур Л. А. Сезонная и межгодовая динамика фитопланктона реки Енисей в районе водозабора Гремячий Лог // Биология внутр. вод. 2014. № 1. С. 38–40 [Ponomareva Yu. A., Schure L. A. Seasonal and interannual dynamics of phytoplankton of the Yenisei river in the area of the Gremyachii Log water-intake facilities // Inland Water Biol. 2014. Vol. 7, N 1. P. 34–36].
- Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. Т. 14. 220 с.
- Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В. А. Абакумова. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 239 с.
- Штамм Е. В., Скурлатов Ю. И., Швыдкий В. О., Байкова И. С., Вичутинская Е. В. Природа токсического воздействия сточных вод предприятий целлюлозно-бумажного производства на водные экосистемы // Хим. физика. 2015. Т. 34, № 6. С. 22–29.
- Щемелинина Т., Патова Е., Тарабукин Д., Анчугова Е., Очеретенко Д., Володин В. Очистка сточных вод лесопромышленного комплекса с использованием микроводорослей // Экология и пром-сть России. 2015. № 19 (7). С. 44–47.
- Amblard C., Couture P., Bourdier G. Effects of a pulp and paper mill effluent on the structure and metabolism of periphytic algae in experimental streams // Aquat. Toxicol. 1990. N 18 (3). P. 137–161.
- Expansion of invasive diatom species *Didymosphenia geminata* (Lyngb.) M. Schmidt and *Diadesmis confervacea* (Grun.) Hustedt in the waters of Serbia // Krizmanic J., Predojević D., Trbojevic I., Vidakovic D. // Book of abstracts. Conference: 6th Balkan Botanical Congress, 2015. Rijeka, Croatia.
- Gentili F. G. Microalgal biomass and lipid production in mixed municipal, dairy, pulp and paper wastewater together with added flue gases // Biores. Technol. 2014. Vol. 169. P. 27–32.
- Hall T. J., Landis W. G. Introduction to special series: Measurement and analysis of the potential long term impact of pulp and paper mill effluent on receiving waters // Int. Environ. Assessment and Management. 2009. Vol. 5, N 2. P. 186–188.
- Lowe R. L. Environmental requirements and pollution tolerance of freshwater diatoms. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 1974. 334 p.
- Madan S., Sachan P., Singh U. A review on bioremediation of pulp and paper mill effluent – An alternative to conventional remedial technologies // J. Appl. and Nat. Sci. 2018. Vol. 10, N 1. P. 367–374.
- Negi R. K., Rajput A. Impact of pulp and paper mill effluents on phytoplanktonic community structure in Ganga River at Bijnor (Up), India // J. Entomol. and Zool. Stud. 2013. N 1 (5). P. 70–73.
- Patova E., Stenina A., Shabalina Y., Sterlyagova I. The list of phytoplankton taxa of the Vychegda River (in the areas impacted wastewaters of pulp and paper industry). Mendeley Data, 2021. Vol. 2, doi: 10.17632/mskrjz8v6n.2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://data.mendeley.com/datasets/mskrjz8v6n/2> (дата обращения: 25.05.2021).
- Sládeček V. System of Water Quality from the Biological Point of View // Arch. Hydrobiol. 1973. Bd. 7, N 7. 218 S.
- Sládeček V. Diatoms as Indicators of Organic Pollution // Acta Hydrochim. Hydrobiol. 1986. Vol. 14, N 29.
- Tarlan E., Dilek F. B., Yetis U. Effectiveness of algae in the treatment of a woodbased pulp and paper industry wastewater // Biores. Technol. 2002. P. 1–5.

Timoshkin O. A., Bondarenko N. A. et al. Mass Development of Green Filamentous Algae of the Genera *Spirogyra* and *Stigeoclonium* (Chlorophyta) in the Littoral Zone of the Southern Part of Lake Baikal // Hydrobiol. J. 2015. P. 13–23.

Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands // Neth. J. Aquat. Ecol. 1994. Vol. 1, N 28. P. 117–133.

Phytoplankton communities of the Vychegda River in the zone of treated wastewater inflow of the pulp and paper industry

E. N. PATOVA¹, A. S. STENINA¹, Yu. N. SHABALINA², I. N. STERLYAGOVA¹

¹*Institute of Biology of Komi Science Centre of the UB of the RAS
167982, Syktyvkar, Kommunisticheskaya str., 28
E-mail: patova@ib.komisc.ru*

²*Pitirim Sorokin Syktyvkar State University
167001, Syktyvkar, Oktyabrsky av., 55*

The results of a study of summer phytoplankton (July 2018–2020) in the middle reaches of the Vychegda River in the places where treated wastewater is discharged from the Mondi Syktyvkar JSC pulp and paper mill are presented. In the phytoplankton of the investigated section of the River, 263 species with varieties of algae of seven divisions were identified: Cyanoptokaryota – 8, Ochrophyta – 4, Rhodophyta – 1, Euglenophyta – 1, Bacillariophyta – 232, Chlorophyta – 15, Charophyta – 2. Mostly widespread in terms of diversity, eurytopic species. For three years of research, the stability of the complex of dominant species and structural diversity has been noted for phytoplankton communities. The basis of the dominant complexes is formed by species from the genera *Aulacoseira*, *Dolichospermum*, *Pandorina*, *Eudorina*, *Closterium*, etc. The composition of dominants is similar for conditionally background points and the zone of discharge of fine waters. Below the wastewater discharge site, a massive development of the thermophilic species of diatom *Diadesmis confervacea*, an indicator of thermal pollution, was noted. The total number of phytoplankton in the Vychegda River at the studied stations was recorded in the range from 1150 to 18000 thousand cells / dm³, biomass – from 0.01 to 0.29 mg / dm³. The ratio of the total abundance and biomass of phytoplankton algae and indicator species forming a complex of dominants reflect an increase in the trophic status of the waters of the surveyed areas and a high degree of anthropogenic load on the ecosystem of the Vychegda River. On the basis of algoindication, the waters of the conditionally background and receiving wastewaters of observation points were assigned to the III quality class (with the quality category 3b – slightly polluted).

Key words: diversity and quantitative indicators of phytoplankton, waste water from pulp and paper production, Vychegda River, northeast of European Russia.