

УДК 561.26

## СТРУКТУРА АССОЦИАЦИЙ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ВОДОТОКОВ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ

© 2025 г. Е.И. Лысенко

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена  
Россия, 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, Географический факультет  
E-mail: lenobl1996@gmail.com

Поступила в редакцию 11.06.2024. После доработки 01.06.2025. Принята к публикации 01.07.2025.

Дельта реки Волги как одна из крупнейших дельт в мире обладает большим разнообразием гидрологических объектов, что создаёт широкий спектр условий для развития диатомовых водорослей. Цель данной работы – изучить видовой состав ассоциаций диатомовых водорослей поверхностного слоя донных отложений в современных водотоках дельты р. Волги, выявить особенности распределения видов в зависимости от местообитания и основные виды-индикаторы данных местообитаний. Работа послужит основой для создания базы данных диатомей и дальнейшего её применения в палеоэкологических реконструкциях. Методом диатомового анализа изучено 24 образца поверхностного слоя донных осадков, отобранных с помощью дночерпателя из различных с точки зрения гидрологии водных объектов на территории Дамчикского участка Астраханского биосферного заповедника. Наиболее массовые виды в изученных объектах – *Aulacoseira granulata*, *Aulacoseira ambigua*, *Stephanodiscus minutulus*, типичные для фитопланктона р. Волги. Один объект – протока Грязнуха – отличается составом доминирующих видов – *Cocconeis placentula*, *Cocconeis pediculus* – и высокой долей бентоса (77-99%). Анализ образцов, отобранных в водотоках по профилям, показал различие в соотношении планктона и бентоса в зависимости от глубины: на более глубоких участках выявлено повышение доли планктонных видов. Результаты диатомового анализа также изучены методом главных компонент. Наиболее существенный фактор формирования диатомовых комплексов в изученных образцах – глубина водотоков. Методом главных компонент достоверно выделяется кластер образцов из наиболее глубоких участков р. Быстрая и одного образца из култук Сазаньего, отобранного вблизи р. Быстрая, характерные виды – *Aulacoseira ambigua* и *Stephanodiscus minutulus*.

**Ключевые слова:** диатомовые водоросли, микропалеонтология, метод главных компонент, экологические индикаторы, поверхностные пробы, Астраханский заповедник.

**DOI:** 10.24412/1993-3916-2025-3-172-182

**EDN:** ZBENGJ

Дельта р. Волги – одна из крупнейших дельт в России и мире. Её площадь составляет 8800 км<sup>2</sup> (Атлас ..., 2015). Помимо большой площади особенностью дельты Волги является очень сложная и динамичная гидрографическая сеть. Её перестройка происходит под влиянием изменений уровня приёмного водоёма – Каспийского моря. Как правило, снижение уровня моря приводит к отмиранию мелких водотоков и концентрации стока в крупных рукавах, подъём уровня моря способствует активному разветвлению русел. Так, например, в связи со снижением уровня с 1930 по 1980 гг. число устьев протоков у морского края дельты (далее – МКД) сначала сократилось с 500 до 230, а к концу периода на фоне подъёма уровня увеличилось до 1000. На данный момент на МКД насчитывают более 800 устьев водотоков (Атлас ..., 2015). В описании гидрологической сети в дельте Волги встречаются специфические термины. Ерик – узкая протока, соединяющая более крупные рукава или водоёмы (Самойлов, 1952). Култук – небольшой залив, образующийся вблизи МКД в устьях протоков за счёт роста прирусловых валов и устьевых аккумулятивных форм. При дальнейшей аккумуляции наносов култук обособляется и превращается в култучный ильмень, затем – в ильмень (полностью изолированный наносами озёрвидный водоём, пересыхающий в межень). Среди временных

водоёмов в дельте встречаются полби, образующиеся при затоплении поймы в половодье (Лактионов и др., 2020).

Разнообразие гидрологических объектов создаёт широкий спектр обстановок для развития диатомовых водорослей. Виды диатомей отличаются по экологическим предпочтениям, поэтому видовой состав диатомовых комплексов может быть использован для характеристики экологических условий современных водотоков. Видовой состав диатомей непосредственно дельты Волги довольно слабо изучен (Болгов и др., 2007; Бухарицин, Лабунская, 2023). В обширной монографии П.И. Бухарицина и Е.Н. Лабунской (2023) представлены результаты изучения фитопланктона низовой Волги в период 2008-2012 гг. Среди диатомовых водорослей наибольшего развития достигали виды *Aulacoseira granulata*, *A. granulata* var. *angustissima* и *A. islandica*. Следует отметить, что в 1980-1890-е гг. преобладали иные виды: *Skeletonema subsalsum* и *Actinocyclus normanii*, которые в более позднее время встречаются спорадически. Среди видов, выявленных в небольшом количестве, авторы отмечают *Amphora ovalis*, *Cyclotella meneghiniana*, *Fragillaria acus*, *Navicula cryptocephala*, *Nitzschia acicularis*, *N. palea*. Также существует ряд работ, посвящённых фитопланктону р. Волги и водохранилищ её бассейна (Генкал, 1992; Фитопланктон ..., 2003; Корнева, 2015). По результатам изучения фитопланктона в Нижней Волге и Ахтубе в 1997 г. среди преобладающих видов диатомей в разные сезоны отмечались *Stephanodiscus hantzschii*, *Skeletonema subsalsum*, *Aulacoseira granulata*, а также мелкие центрические диатомеи. В озёрах и ериках Волго-Ахтубинской поймы в мае наибольшего развития достигал *S. hantzschii*, а летом было более широкое видовое разнообразие за счёт видов рода *Nitzschia* и видов-обрастателей родов *Cocconeis*, *Synedra* (Фитопланктон ..., 2003).

Цель данной работы – изучить видовой состав ассоциаций диатомовых водорослей поверхностного слоя донных отложений в современных водотоках дельты р. Волги, выявить особенности распределения видов в зависимости от местообитания и основные виды-индикаторы данных местообитаний. Также эта работа может послужить основой для создания базы данных с целью дальнейшего применения в палеоэкологических и палеогеографических реконструкциях голоцена дельты на основе метода актуализма. Изучение современных ассоциаций позволит выявить характерные таксоны для разнообразных водных объектов дельты. Эта информация может быть использована как для целей экостратиграфии, так и в современных экологических исследованиях дельты.

Статистические методы широко применяются в биологии и экологии. При работе с выборками с большим количеством переменных, к которым относятся диатомовые ассоциации из поверхностного слоя донных отложений дельты, необходимо статистически обусловленное выявление главных трендов изменчивости данных. Метод главных компонент (МГК) используется для определения основных направлений изменчивости, например, видового состава сообществ или параметров среды (Вокуева, Денисов, 2018; Briddon et al., 2020, Lever et al., 2017). В данной работе он является основным статистическим методом для выявления ведущих факторов, влияющих на состав диатомовых ассоциаций из поверхностного слоя донных осадков различных водотоков в дельте р. Волги.

В исследовании рассмотрены диатомовые ассоциации из нижней части дельты. Этот участок выбран ввиду его близости к Каспийскому морю, что даёт возможность запечатлеть наиболее высокое видовое разнообразие, которое определяется пограничными условиями в системе «река-море», и наличия разнообразных гидрологических объектов, специфичных для дельты. Район изучения охватывает Дамчикский участок Астраханского заповедника (ФГБУ ..., 2025). Средняя температура воды в р. Волге в конце июня составляет +21.7°C, pH – 7.0-8.5 (Астраханский заповедник, 1991). Водные объекты в дельте отличаются высокой динамичностью (ввиду сезонных колебаний основных протоков) и высоким содержанием азота и фосфора – необходимых элементов для питания диатомей (Головатых, Галушкина, 2018).

### Материалы и методы

Материал для исследования – пробы из поверхностного слоя донных осадков современных водотоков на территории Дамчикского участка Астраханского биосферного заповедника в юго-западной части дельты Волги (рис. 1).

Пробы отбирались в июне 2017 и сентябре 2018 гг. из 7 водных объектов с различными гидрологическими характеристиками (рис. 1). Пять из них – относительно крупные водные объекты, описанные ниже.

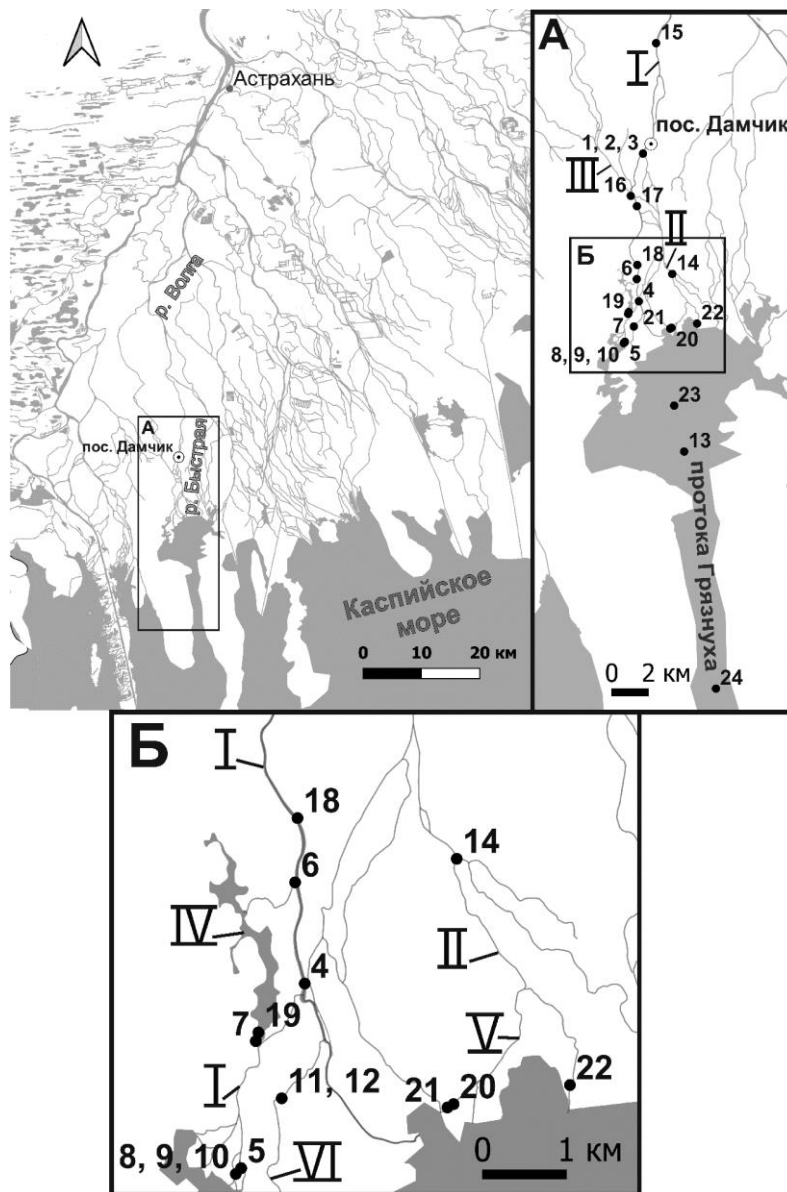
1) Р. Быстрая – один из рукавов основного русла р. Волги; ширина в пределах участка – 40-180 м, в устьевой части – около 30 м, глубина – 4-8 м;

2) Ерик Дубной – левый рукав р. Быстрая, отделяющийся в р-не пос. Дамчик; ширина – 20-90 м, глубина – до 3.9 м;

3) Ерик Лотосный – правый рукав р. Быстрая, отделяющийся в 3 км южнее пос. Дамчик, ширина – 10 м, глубина – до 2.5 м (Литвинова, Ключников, 2023);

4) Култук Сазаний – обособляющийся слабопроточный водоём к западу от р. Быстрая; длина – примерно 2500 м, ширина – от 80 до 300 м в наиболее широких участках; площадь – 0.38 км<sup>2</sup>, степень зарастания макрофитами – около 53%;

5) Протока Грязнуха, длина – около 18 км, ширина в южной части – 1-1.5 км, в северной расширенной части – до 7 км; глубина – около 1 м.

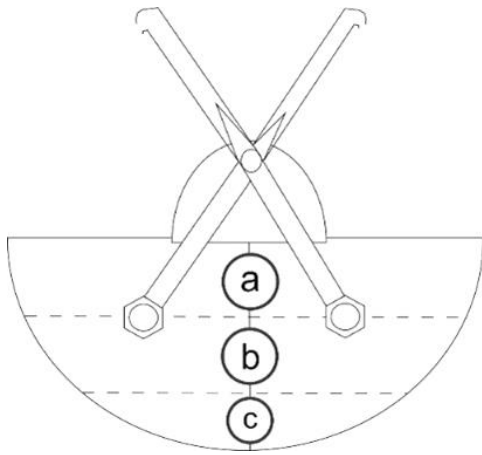


**Рис. 1.** Местоположение точек отбора и номера образцов. Условные обозначения: I – р. Быстрая, II – ер. Дубной, III – ер. Лотосный, IV – култук Сазаний, V – протока Мартышка, VI – безымянная протока (рукав р. Быстрой).

Также материал отобран из 2 узких протоков, ответвляющихся от более крупных в устьевой части: протоки Мартышка (рукав ер. Дубного; ширина – 20-25 м, глубина – до 4 м) и безымянной протоки (рукав р. Быстрой; ширина – 20-25 м).

Вдоль протоков, особенно вдоль узких (первые десятки метров), наблюдаются заросли ивняка, в култуке Сазаньем – обширные тростниковые заросли. Заросли тростника также окаймляют протоку Грязнуха и встречаются в виде обособленных скоплений в самой протоке. Они отмечаются и в устьевых частях мелких рукавов, впадающих в пр. Грязнуха.

Отбор проб донных отложений производился с борта лодки с помощью малого дночерпателя системы Ван Вина площадью захвата 200 см<sup>2</sup>, что соответствует стандартной методике (Диатомовые водоросли СССР, 1974). Образцы помещались в герметичные пластиковые пакеты и фиксировались раствором формалина до появления слабого запаха. Предполагалось, что ввиду малого размера створок диатомовых водорослей и особенностей выпадения осадка из взвеси в область захвата дночерпателя могут попадать и более древние осадки, что впоследствии исказит представления о видовом разнообразии современных водотоков. Для устранения возможного искажения результатов диатомового анализа за счёт более древних осадков послойно отбирались 3 образца из одной пробы (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема отбора проб донного осадка: наиболее молодой осадок соответствует образцу “а”.

Слои осадка выделялись путём последовательного его извлечения из дночерпателя. Порядок отбора образцов из пробы: “с” – “б” – “а” (рис. 2), от наиболее древнего (с) к наиболее молодому (а) слою осадков. Мощность отбираемых слоёв составляла порядка 2-3 см. В случае, если осадок был представлен песком с раковинным детритом или объём отобранного материала был очень мал, отбирался только один образец из пробы. В 2017 году пробы отобраны из 10 точек, в 2018 г. – из 14 точек.

При отборе проб в 2018 году одновременно в придонном слое с помощью кондуктометра YSI10 фиксировались: глубина отбора (м), температура (°C) и электропроводность (µS/cm). Ввиду ограничений функций кондуктометра, рН воды измерялся отдельно в приповерхностном слое с помощью электронного рН-метра карандашного типа Kellymeter PH-009(I). По техническим причинам данные характеристики измерялись только при отборе проб в 2018 г. В протоках для выявления возможных различий в видовом составе диатомовых ассоциаций отбор производился по

профилям: левый берег – стрежень протоки – правый берег. В узких протоках отбирались 2 образца по профилю: левый или правый берег – стрежень протоки. Такой способ отбора проведён в точках №№ 1-3, 8-10, 11-12, 20-21 (табл. 1).

Измерения глубины и ширины р. Быстрая, ер. Дубного, пр. Мартышка и пр. Грязнуха, а также построение поперечных профилей по створам вблизи точек отбора произведено с помощью акустического доплеровского профилографа. Данные были получены и любезно предоставлены н.с. кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ к.г.н. П.Н. Терским. Характеристики остальных объектов (ширина, длина) и степень зарастания култука Сазаньего (в % от общей площади водоёма) измерены дистанционными методами с использованием онлайн-сервиса EO Browser и подложки спутниковых снимков Sentinel-2 от 2018 г., актуальной на период полевых исследований (EO Browser, 2017).

В данной работе представлены результаты изучения образцов только из верхнего слоя отложений (а). В общей сложности проанализированы 24 образца поверхностного слоя донных осадков. Выборка створок в образцах составляла 250-300 экземпляров, за исключением образца № 23, в котором она составила 150 створок ввиду их малой концентрации.

*Техническая обработка образцов* для диатомового анализа проводилась по стандартным методикам (Smol et al., 2001) в НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета МГУ. Таксономическое определение диатомовых водорослей

произведено с помощью светового микроскопа JENAVAL (Carl Zeiss) при увеличении в 1000 раз. Определение контролировалось при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) в центре коллективного пользования на базе Лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии МГУ. Названия таксонов приведены в соответствии с электронной базой данных Algaebase (Guiry M.D., Guiry G.M., 2025).

*Статистический анализ.* Выборка была подвергнута статистической обработке с помощью метода главных компонент (МГК) в вычислительной среде R (Егорова, Тимовкин, 2018). Для этого были выбраны виды, доля которых в образце составляла от 3% без учёта их частоты встречаемости. То есть если вид обнаружен только в одном образце, но его доля составила 3%, то он учитывался при обработке МГК. Для упрощения визуализации результатов, образцы из безымянной протоки и протоки Мартышка были включены в группы водотоков более высокого порядка (р. Быстрая и ер. Дубного соответственно).

**Таблица 1.** Перечень изученных образцов и гидрологические характеристики, измеренные при отборе проб в 2018 г.

№ образца	Место отбора пробы	Расстояние от устья, км	Глубина отбора, м	pH	Электропроводность, $\mu\text{S}/\text{cm}$	Температура воды, $^{\circ}\text{C}$
1	р. Быстрая (прав. бер.)	11.57	0.9	8.26	292.6	19.1
2	р. Быстрая (стрежень)		4.9	8.17	298	19.9
3	р. Быстрая (лев. бер.)		1	8.22	298	19.9
4	р. Быстрая	2.71	2.7	8.17	299	19.9
5	р. Быстрая (лев. бер.)	0.24	1.2	7.93	299	19.8
6	р. Быстрая	4.10	1.3	8.14	298.4	19.8
7	култук Сазаний	0.04	1.6	7.97	306.9	19.2
8	р. Быстрая (стрежень)	0.17	2.2	8.34	298.3	20.1
9	р. Быстрая (прав. бер.)		1	8.22	301.4	20.1
10	р. Быстрая (лев. бер.)		1	8.14	301	20.1
11	безымянная протока (рукав р. Быстрая; лев. бер.)	–	0.5	8.48	304.1	20.3
12	безымянная протока (стрежень)	–	2	8.09	301.2	20.1
13	протока Грязнуха	13.22	0.9	8.65	294.6	18.8
14	ер. Дубной	–	3.9	8	302.5	20.1
15	р. Быстрая	17.8	–	–	–	–
16	ерик Лотосный	–	–	–	–	–
17	р. Быстрая	8.24	–	–	–	–
18	р. Быстрая	4.66	–	–	–	–
19	култук Сазаний	0.14	–	–	–	–
20	пр. Мартышка (рукав ер. Дубного; стрежень)	–	–	–	–	–
21	пр. Мартышка (прав. бер.)	–	–	–	–	–
22	ер. Дубной (устьевая часть)	–	–	–	–	–
23	протока Грязнуха	13.48	–	–	–	–
24	протока Грязнуха	0.42	–	–	–	–

### Результаты и обсуждение

Всего в образцах определено 155 таксонов диатомовых водорослей. На пузырьковой диаграмме представлены виды, на которые приходится от 1% численности створок в образце (рис. 3).

В изученных водных объектах массово встречаются планктонные виды, характерные для р. Волга: *Aulacoseira granulata*, *A. ambigua*, *Stephanodiscus minutulus*. Доля планктонных видов в среднем по всем объектам, кроме протоки Грязнуха, составляет 79%, что может объясняться массовым осаждением клеток планктонных диатомей. Грязнуха отличается крайне низкой долей планктона (1-23%) и преобладанием видов-обрастателей рода *Cocconeis*: *C. placentula*, *C. pediculus*, которые также выявлены в низовьях Волги (Фитопланктон ..., 2003; Бухарицин, Лабунская, 2023). Среди сопутствующих видов наиболее массовыми и часто встречающимися являются: *Stephanodiscus astraea* и *Stephanocyclus meneghinianus*, характерные для волжских вод. Рядом авторов вид *Amphora ovalis* выявлен как сопутствующий в низовьях Волги и некоторых волжских водохранилищах (Генкал, 1992; Бухарицин, Лабунская, 2023). В данной работе схожий по морфологии створок сопутствующий вид, также часто встречающийся в изученных образцах, определен как *A. copulata*.

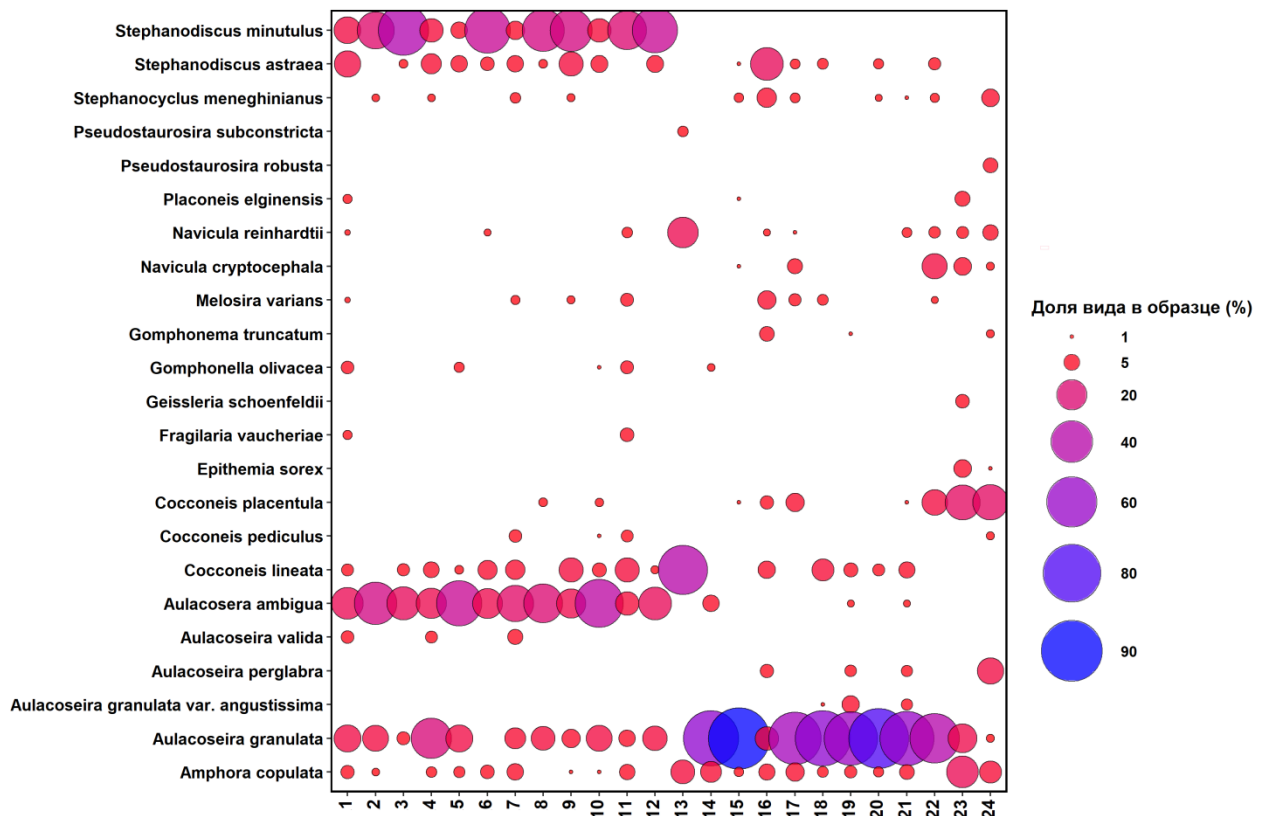


Рис. 3. Виды диатомей, выявленные в образцах поверхностного слоя донных отложений.

По сравнению с литературными данными, вид *Skeletonema subsalsum* не был выявлен. Другой планктонный вид *Actinocyclus normanii*, ранее имевший широкое развитие в волжских водохранилищах и Нижней Волге, встречается в виде единичных створок в р. Быстрая и пр. Грязнуха. В единичных экземплярах в р. Быстрая выявлены створки морского вида *Thalassiosira eccentrica*, характерного для Каспийского моря. Явного влияния каспийских вод на состав диатомовых комплексов не отмечается.

В большей части образцов из р. Быстрая доминируют виды *Stephanodiscus minutulus* и *Aulacoseira ambigua*, среднее содержание каждого вида – около 30%. Исключение составляют образцы №№ 15, 17, 18, в которых значительно преобладает *Aulacoseira granulata* (65-90%). Сопутствующие виды в р. Быстрая: планктонные *Stephanodiscus astraea* (в среднем 5%), *Stephanocyclus meneghinianus* (1%) и *Melosira varians* (1%), а также *Amphora copulata* (2%) и *Cocconeis lineata* (4%), встречающиеся как в бентосе, так и в обрастаниях. Доля планктонных видов изменяется от 73 до 96%, бентосных (в т.ч. видов-обрастателей) – от 4 до 27%. Сравнение образцов №№ 1-3 и 8-10, отобранных по профилям, показало, что они обладают схожим видовым составом. Отличия заключаются

в соотношении планктонных/бентосных видов. В образцах №№ 2, 3 и 8, отобранных с глубин 1.0, 4.9 и 2.2 м соответственно вдоль левого берега (№ 2) и у стрежня протоки (№№ 3 и 8), доля планктона превышает 90%. Максимальная доля планктона (96%) отмечена в образце № 15. Несмотря на отсутствие измерений глубины отбора, местоположение точки № 15 на наибольшем расстоянии от устья р. Быстрая (табл. 1) позволяет предположить относительно большую глубину протоки на этом участке, что объясняет столь высокую долю планктона.

В ер. Дубном доминирует вид *Aulacoseira granulata* (в среднем 65%), сопутствующие виды: *Cocconeis placentula* (7%), *A. ambigua* (3%), *Stephanodiscus astraea* (2%). Суммарная доля планктона – 66-80%, наибольшее содержание приурочено к более широкой части ерика (90 м) с глубиной 3.9 м. В образце из устьевой части ерика в месте его сужения до 20 м наблюдается снижение численности планктона до 66%.

В ер. Лотосный иной преобладающий вид и в целом доминанты не столь выраженные: *Stephanodiscus astraea* (24%) и *A. granulata* (11%). Сопутствующие виды: *Stephanocyclus meneghinianus* (8%), *Cocconeis lineata* (6%), *Amphora copulata* (5%), *Gomphonema truncatum* (4%), *C. placentula* и *Aulacoseira perglabra* (по 3%). Состав диатомовых ассоциаций ерика Лотосного отличается от ер. Дубного большей долей бентосных видов (39%).

В култуке Сазаньем доминанты отличаются в зависимости от места отбора. В № 7 из отмелой части култука (1.6 м), наиболее близкой к р. Быстрая, преобладает *A. ambigua* (30%), сопутствующие виды идентичны таковым из р. Быстрая (*A. granulata* – 9%, *C. lineata* – 8%, *Amphora copulata* – 5%, *Stephanodiscus minutulus* и *S. astraea* – 7 и 5%,). Для образца № 19 отсутствуют измерения глубины, однако, судя по местоположению точки, он отобран в более глубокой части култука и отличается резким преобладанием *A. granulata* (68%). Сопутствующие виды: *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* – 6%, *C. lineata* – 4%, *A. copulata* – 3%. Суммарная доля планктона также выше: 79% против 61% в № 7. Доля бентоса и эпифитов, а также видовой состав диатомей не обнаруживают существенных отличий от изученных проток. Это говорит об отсутствии ожидаемого влияния степени зарастания култука макрофитами (53%) на видовой состав диатомей, однако для подтверждения данного вывода необходима большая выборка образцов из разных участков водного объекта.

В протоке Мартышка доминирует *A. granulata* (в среднем 85%), сопутствующие виды: *Cocconeis lineata* – 4%, *Amphora copulata* – 3%. В образце № 20, отобранном вблизи стрежня протоки, наибольшая доля планктона – 92%, у правого берега (№ 21) доля планктона составляет 78%.

В безымянной протоке в устьевой части р. Быстрая преобладают *Stephanodiscus minutulus* (в среднем 41%) и *A. ambigua* (18%). Состав и численность сопутствующих видов изменяются в зависимости от местоположения и глубины отбора. У левого берега (глубина 0.5 м) выявлена повышенная доля бентосных видов и обрастателей *C. lineata* (12%), *A. copulata* (5%), *Fragilaria vaucheriae* (4%), наряду с планктонным *A. granulata* (6%). Ближе к стрежню протоки (глубина 2.0 м) среди сопутствующих видов отмечены преимущественно планктонные *A. granulata* (13%) и *Stephanodiscus astraea* (6%). Суммарная доля планктона существенно выше в более глубокой части протоки (у стрежня) – 92%, по сравнению с образцом у левого берега (56%).

Протока Грязнуха отличается принципиально иными доминантами – бентосными видами рода *Cocconeis*: *C. placentula* (в №№ 23 и 24 – в среднем 28%), *C. lineata* (в № 13 – 57%). Суммарная доля бентосных видов наивысшая среди всех изученных объектов – в среднем 86%, максимальная (99%) отмечается в образце № 13, отобранном с глубины 0.9 м. Среди сопутствующих видов выявлены *Amphora copulata* (в среднем 15%), *Navicula reinhardtii* (9%) и *A. granulata* (7%).

По отношению к рН среды количественно преобладают виды-индифференты, однако их видовое разнообразие невелико: из 23 таксонов с численностью от 1% только 3 относятся к индифферентам. Средняя и максимальная численность наиболее массовых видов-индифферентов в образцах: *A. granulata* – 32% и 91%, *Navicula reinhardtii* – 2% и 20%. Также в составе изученных диатомовых комплексов довольно высока доля алкалифильных видов. Среди них наиболее массовые – *Stephanodiscus minutulus* (средняя численность 15%, максимальная – 58%) и *Aulacoseira ambigua* (15% и 54% соответственно). Менее обильные – *Cocconeis lineata* (6% и 57%) и *Amphora copulata* (4% и 22%). Алкалифилы обладают более широким видовым разнообразием (16 из 23 видов с численностью от 1%). Выявлен один алкалибионтный вид *Stephanodiscus astraea* (средняя

численность 4%, максимальная – 24%). Ацидофилы *Epithemia sorex* и *Aulacoseira perglabra* выявлены точно в протоке Грязнуха. Повышенная доля алкалифилов и алкалибионтов, развивающихся в слабощелочных и щелочных водах, соответствует значениям pH воды (табл. 1).

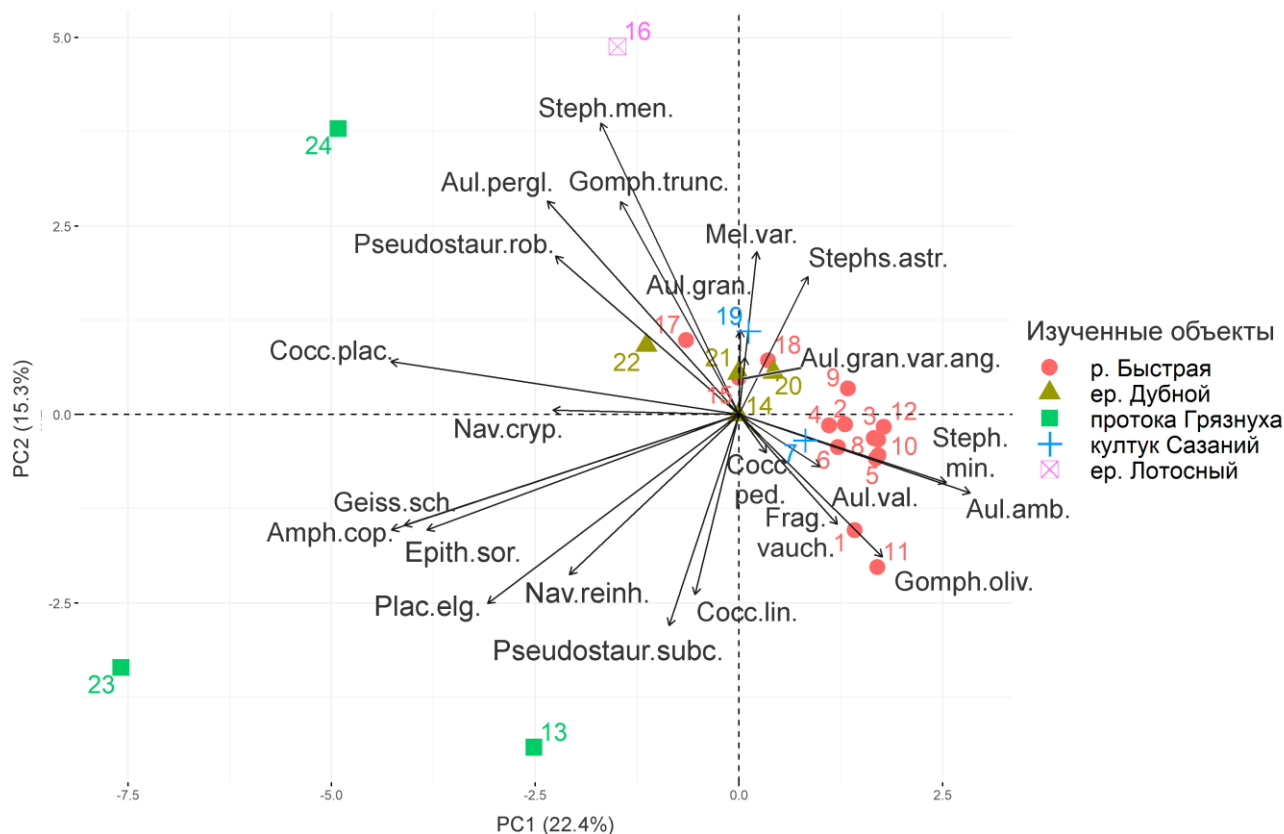
По результатам статистического анализа получены две главные компоненты, оказывающие наибольшее влияние на распределение диатомей в исследованных водных объектах. Суммарная доля выборки, подчиняющаяся главным компонентам, составляет 37.8%. То есть основные два фактора объясняют меньше половины общей изменчивости данных о видовом составе диатомовых ассоциаций в образцах, что позволяет выдвинуть лишь приблизительные предположения о главных факторах формирования таксономического состава диатомовых водорослей. Величины факторных нагрузок, которые показывают вклад переменных (отдельных видов диатомей) в изменчивость вдоль компоненты, указаны в таблице 2.

**Таблица 2.** Факторные нагрузки по первым двум компонентам.

Виды диатомей	ГК1, глубина водотоков	ГК2, уменьшение скорости течения
Amph.cop. ( <i>Amphora copulata</i> )	-0.38199	-0.16588
Aul.amb. ( <i>Aulacoseira ambigua</i> )	<b>0.25404</b>	-0.11283
Aul.gran. ( <i>Aulacoseira granulata</i> )	0.00130	0.12130
Aul.gran.var.ang. ( <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> )	0.00664	0.08195
Aul.pergl. ( <i>Aulacoseira perglabra</i> )	-0.21084	<b>0.30692</b>
Aula.val. ( <i>Aulacoseira valida</i> )	0.08870	-0.07480
Cocc.lin. ( <i>Cocconeis lineata</i> )	-0.04848	-0.25893
Cocc.ped. ( <i>Cocconeis pediculus</i> )	0.03004	-0.05517
Cocc.plac. ( <i>Cocconeis placentula</i> )	<b>-0.38292</b>	0.07600
Epith.sor. ( <i>Epithemia sorex</i> )	<b>-0.34312</b>	-0.16602
Frag.vauch. ( <i>Fragilaria vaucheriae</i> )	0.10809	-0.15774
Geiss.sch. ( <i>Geissleria schoenfeldii</i> )	<b>-0.36797</b>	-0.15933
Gomph.oliv. ( <i>Gomphonella olivacea</i> )	0.15761	-0.20453
Gomph.trunc. ( <i>Gomphonema truncatum</i> )	-0.12994	<b>0.30587</b>
Mel.var. ( <i>Melosira varians</i> )	0.01930	0.23369
Nav.cryp. ( <i>Navicula cryptocephala</i> )	-0.20438	0.00606
Nav.reinh. ( <i>Navicula reinhardtii</i> )	-0.18664	-0.23011
Plac.elg. ( <i>Placoneis elginensis</i> )	<b>-0.27641</b>	<b>-0.27146</b>
Pseudostaur.rob. ( <i>Pseudostaurosira robusta</i> )	-0.20202	0.22756
Pseudostaur.subc. ( <i>Pseudostaurosira subconstricta</i> )	-0.07695	<b>-0.30332</b>
Steph.men. ( <i>Stephanocyclus meneghinianus</i> )	-0.15202	<b>0.41884</b>
Steph.min. ( <i>Stephanodiscus minutulus</i> )	<b>0.22766</b>	-0.09812
Stephs.astr. ( <i>Stephanodiscus astraea</i> )	0.07553	0.19829

Первая компонента объясняет 22.4% выборки и несёт наибольшую информацию об изменчивости признаков (видового состава диатомей в образцах, рис. 4). По-видимому, она отражает глубину водотоков. Положительные значения нагрузки по первой компоненте преимущественно у планктонных видов *Aulacoseira ambigua*, *A. valida*, *Stephanodiscus minutulus*, *S. astraea*, *Melosira varians*. Наибольших значений достигают *A. ambigua* и *S. minutulus* (табл. 2, жирный шрифт) – типичные обитатели эвтрофных вод. В группу с относительно высокими положительными нагрузками также входит *Fragilaria vaucheriae*, который встречается как в планктоне, так и в обрастаниях, и *Gomphonella olivacea* – бентосный вид, являющийся индикатором эвтрофирования, поэтому присутствие этих видов в одной группе с планктоном связано в большей степени с трофическим статусом вод. Вместе с тем наибольший вклад в изменчивость вносят бентосные виды, т.к. их значения нагрузки по модулю являются наибольшими: *Cocconeis placentula*, *Epithemia sorex*,

*Geissleria schoenfeldii* и *Placoneis elginensis* (табл. 2, жирный шрифт). Отрицательный знак факторной нагрузки говорит об обратной связи между усилением первого фактора и повышением доли вида. По-видимому, с усилением первого фактора связано увеличение доли планктонных видов и уменьшение доли бентосных таксонов. Таким образом, можно сделать предположение, что первый и наиболее значимый фактор формирования диатомовых ассоциаций на изучаемой территории – глубина водотоков, однако следует отметить, что он описывает меньше четверти изменчивости выборки.



**Рис. 4.** Результаты анализа ГК. График факторных нагрузок (стрелки) и ординация исследованных образцов в осях значимых главных компонент.

Распределение факторных нагрузок видов диатомей относительно второй компоненты менее однозначно для интерпретации. В результате комплексного анализа местоположения точек отбора сделано предположение, что вторая компонента отражает уменьшение скорости течения. Значения нагрузки по ней не столь информативны для интерпретации. Наибольшие положительные значения – у видов планктонных *Stephanocyclus meneghinianus* и *Aulacoseira perglabra* и бентосного *Gomphonema truncatum* (табл. 2, жирный шрифт). Совместное нахождение *S. meneghinianus* и *G. truncatum* приурочено к образцам из ер. Лотосного и южной части протоки Грязнуха (рис. 3). Данные объекты отличаются малой глубиной и высокой степенью зарастания высшей водной растительностью. Наибольшие отрицательные значения по второй компоненте – у эпифитного вида *Pseudostaurosira subconstricta* и бентосного *Placoneis elginensis*, которые широко распространены в северной части протоки Грязнуха. В целом все указанные виды соотносятся с мелководными условиями водоёмов и их высокой степенью зарастания. Более информативным для интерпретации второй компоненты может быть противоположное положение образцов из протоки Грязнуха № 24 и №№ 13 и 23 относительно оси второго фактора, что, вероятно, объясняется литологическим составом осадка. Согласно исследованиям гранулометрического состава осадков в этом районе дельты Волги (Касимов и др., 2016), в южной части протоки (обр. № 24) осадок представлен алевритом, в северной – мелкозернистыми песками (обр. №№ 13, 23) ввиду близости устьев многочисленных проток,

впадающих в пр. Грязнуху (рис. 1). Южная часть протоки отличается высокой степенью зарастания тростником и крайне низкими скоростями течения, что способствует накоплению алевритов. Анализ местоположения точек отбора образцов из других объектов показал, что прямую зависимость от фактора демонстрируют образцы из устьевых частей водотоков – ериков Лotosного (обр. № 16), Дубного (№ 22), протоки Мартышка (№№ 20 и 21) и из участка култука Сазаньего (№ 19), более удалённого от р. Быстрая. Кроме того, в этой группе находятся 3 образца из р. Быстрая: №№ 15 и 17 отобраны в местах разветвления русла, № 18 – на изгибе излуины. Можно предположить падение скоростей течения на данных участках. По-видимому, уменьшение скорости течения является вторым по значимости фактором формирования диатомовых ассоциаций в отобранных образцах, однако он объясняет лишь 15.3% изменчивости выборки.

На рисунке 4 достоверно выделяется только кластер образцов из р. Быстрая №№ 2-6, 8-10 и 12. Для них характерна относительно большая глубина отбора – от 1 м. В этот кластер также попал образец № 7 из култука Сазаньего, отобранный с глубины 1.6 м в месте соединения култука с р. Быстрая. Этим объясняется сходство видового состава образца № 7 и образцов из р. Быстрая и их положение в одном кластере. Видами-индикаторами этой группы являются *Aulacoseira ambigua* и *Stephanodiscus minutulus* – типичные виды для фитопланктона р. Волга. Образцы из пр. Грязнуха №№ 13, 23 и 24 на рисунке 4 демонстрируют наименьшее сходство по видовому составу как с образцами из остальных водных объектов, так и между собой. Это означает, что условия формирования диатомовых ассоциаций в пр. Грязнуха значительно отличаются от обстановок култуков, ериков и рек. Основные гидрологические отличия протоки (особенно в северной части) – мелководность (табл. 1) и значительная ширина (от 1 до 7 км). Низкое сходство образцов из самой протоки, вероятно, объясняется удалённостью точек отбора друг от друга (2.5-12.5 км; рис. 1) и большей степенью влияния локальных факторов (например, тип субстрата, мутность воды, зарастание разными видами водных растений и др.).

### Выводы

Наиболее массовые и широко распространённые виды диатомей в изученных водных объектах Дамчикского участка – *Aulacoseira granulata*, *Aulacoseira ambigua*, *Stephanodiscus minutulus* – имеют большое сходство с набором видов, типичным для фитопланктона р. Волги. Видовой состав р. Быстрая, ер. Лotosного, ер. Дубного, протоки Мартышка, култука Сазаньего и безымянной протоки в устье р. Быстрая в большей степени находится под влиянием волжских вод, характерно преобладание планктона. Протока Грязнуха отличается иным составом доминант, но также типичных для р. Волги: *Cocconeis placentula*, *C. pediculus*, в ней преобладает бентос и эпифиты.

Анализ образцов, отобранных в водотоках по профилям, показал различие в соотношении планктона и бентоса в зависимости от глубины: на более глубоких участках, обычно тяготеющих к стрежню, выявлено повышение доли планктонных видов.

Среди видов *Skeletonema subsalsum* и *Actinocyclus normanii*, доминировавших в волжских водохранилищах и Нижней Волге в 1980-90-х годах, в ходе работы выявлен только *Actinocyclus normanii* в виде единичных створок. Практически полное отсутствие типичных морских видов в составе диатомовых ассоциаций изученных водотоков не позволяет сделать вывод о влиянии каспийских вод.

По результатам метода главных компонент наиболее существенным фактором формирования диатомовых ассоциаций поверхностного слоя донных отложений на территории Дамчикского участка является глубина водотоков. По отношению к этому фактору однозначно выделяется кластер образцов из более глубоководных участков р. Быстрая и одного образца из култука Сазаньего, отобранного вблизи р. Быстрая, с характерными видами *Aulacoseira ambigua* и *Stephanodiscus minutulus*. Большое сходство с этим кластером демонстрируют образцы из ер. Дубного, протоки Мартышка, участка култука Сазаньего, удалённого от р. Быстрая, и безымянной протоки в устьевой части р. Быстрая, однако они отличаются прямой зависимостью и от второго фактора – уменьшение скорости течения. Общих видов-индикаторов для данных объектов не выявлено.

На графике ординации образец из ер. Лotosного отличается от остальных водных объектов за счёт иного доминанта – *Stephanodiscus astraea* и наибольшей доли бентосных видов среди водных объектов, в которых преобладает планктон.

Образцы из протоки Грязнуха по видовому составу значительно отличаются от остальных водных объектов и также демонстрируют различия между собой, что вероятно говорит о большем влиянии локальных факторов на формирование видового состава диатомовых ассоциаций (гидрологических, гидрохимических и др.). Характерной чертой является наивысшая доля бентоса и обрастателей среди всех изученных объектов.

*Благодарности.* Автор выражает искреннюю благодарность П.Н. Терскому за предоставленные результаты измерений гидрологических характеристик водотоков дельты Волги.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 1022040500602-6-1.7.1 «Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астраханский заповедник. 1991 / Ред. Г.А. Кривоносова, Г.В. Русакова. М.: ВО «Агропромиздат». 191 с.
- Атлас дельты Волги: геоморфология, русловая и береговая морфодинамика. 2015 / Ред. В.Н. Коротаев, Г.И. Рычагов, Н.А. Римский-Корсаков. М.: Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 128 с.
- Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А.* 2007. Каспийское море: экстремальные гидрологические события. / Ред. М.Г. Хубларян. М.: Наука. 381 с.
- Бухарицин П.И., Лабунская Е.Н.* 2023. Фитопланктон низовьев Волги и северной части Каспийского моря. М.: Издательский дом Академии естествознания. 336 с.
- Вокуева С.И., Денисов Д.Б.* 2018. Использование математических методов в оценке состояния экосистемы озера Имандра по диатомовым комплексам донных отложений // Математические исследования в естественных науках. № 14. С. 134-144.
- Генкал С.И.* 1992. Атлас диатомовых водорослей планктона реки Волги. СПб.: Гидрометеиздат. 128 с.
- Головатых Н.Н., Галушкина Н.В.* 2018. Гидрохимический режим каналов-рыбоходов дельты р. Волги в период половодья (по данным 2017 г.) // Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли. С. 32-36.
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). 1974 / Ред. З.И. Глезер, А.П. Жузе, И.В. Макарова и др. Л.: Наука. 403 с.
- Егорова Д.К., Тимовкин С.Н.* 2018. Реализация метода главных компонент в вычислительной среде R // Огарёв-Online. № 1. С. 1-8.
- Касимов Н.С., Касатенкова М.С., Ткаченко А.Н., Лычагин М.Ю., Крооненберг С.Б.* 2016. Геохимия лагунно-маршевых и дельтовых ландшафтов Прикаспия. М.: Лига-Вент. 244 с.
- Корнева Л.Г.* 2015. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги / Ред. А.И. Копылов. Кострома: Костромской печатный дом. 284 с.
- Лактионов А.П., Афанасьев В.Е., Капитонова О.А.* 2020. Конспект флоры Астраханского государственного природного биосферного заповедника // Фиторазнообразие Восточной Европы. Т. 14. № 4. С. 398-419.
- Литвинова Н.В., Ключников Э.Р.* 2023. Проточность ериков дельты Волги – экосистемная значимость, современные проблемы и сохранение на заповедной территории // Актуальные проблемы биоразнообразия и биотехнологии. С. 114-116.
- Самойлов Н.В.* 1952. Устья рек. М: Географгиз. 528 с.
- Фитопланктон Нижней Волги. Водохранилища и низовье реки. 2003 / Ред. И.С. Трифонова. СПб.: Наука. 229 с.
- Briddon C.L., McGowan S., Metcalfe S.E., Panizzo V., Lacey J., Engels S., Leng M., Mills K., Shafiq M., Idris M.* 2020. Diatoms in a Sediment Core from a Flood Pulse Wetland in Malaysia Record Strong Responses to Human Impacts and Hydro-Climatic over the Past 150 Years // Geo: Geography and Environment. Vol. 7. No. 1. P. 1-20.
- Lever J., Krzywinski M., Altman N.* 2017. Principal Component Analysis // Nature Methods. Vol. 14. No. 7. P. 641-642.
- Smol J.P., Birks H.J., Last W.M.* 2001. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers: Alphen aan den Rijn. 327 p.
- ФГБУ «Астраханский биосферный заповедник». 2025 [Электронный ресурс <https://astrakhanzapoved.ru> (дата обращения 30.01.2025)].
- EO Browser. 2017. Sentinel Hub [Электронный ресурс <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser> (дата обращения 21.01.2025)].
- Guiry M.D., Guiry G.M.* 2025. AlgaeBase. World-Wide Electronic Publication, National University of Ireland, Galway [Электронный ресурс <https://www.algaebase.org/> (дата обращения 30.05.2024)].