

# ДИАТОМОВЫЕ АССОЦИАЦИИ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКАХ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ПАЛЕОРЕКОНСТРУКЦИЙ

Е.И. Лысенко

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,  
лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена

Инженер; e-mail: lenobl1996@gmail.com

Изучение колебаний уровня Каспийского моря обуславливает интерес к палеогеографическим реконструкциям обстановок осадконакопления в дельте Волги. Диатомовый анализ в течение длительного времени успешно применяется для реконструкций положения береговых линий морей и озер. В данной работе проведено сравнение состава диатомовых ассоциаций поверхностного слоя донных отложений в нижней части дельты Волги из водных объектов, отличающихся по гидрологическим характеристикам, с ископаемыми ассоциациями, полученными при бурении скважин в привершинной и нижней частях дельты. С целью выявления видов-индикаторов современных местообитаний и уточнения палеореконовструкций более ранних условий осадконакопления на основе метода актуализма к выборкам современных и ископаемых диатомей применены статистические методы: главных компонент и неметрического многомерного шкалирования. Статистический анализ диатомовых водорослей поверхностного слоя донных отложений и осадков из двух скважин в дельте Волги позволил создать базу данных для достоверных реконструкций этапов осадконакопления в руслах дельтовых протоков и слабопроточных условий на данной территории. В верхней части отложений скважин, соответствующей наиболее позднему этапам осадконакопления, выявлены виды, нехарактерные для современных обстановок – *Hantzschia amphioxys* и *Craticula cuspidata*, вероятно, являющиеся индикаторами субаэральных условий. Также в скважинах выявлены условия замкнутых пресных водоемов (ильменей), подтвержденные литологическим составом отложений и не имеющие аналогов среди изученных водных объектов. Виды родов *Epithemia* и *Eunotia* являются индикаторами данных условий. По сравнению с ископаемым материалом, в некоторых образцах поверхностного слоя донных отложений из р. Быстрой, култука Сазаньего, ериков Лотосного и Дубного наблюдается резкое повышение доли планктонного вида *Aulacoseira granulata* (до 90%), что может быть связано с массовым осаждением створок данного вида в период отбора поверхностных проб.

**Ключевые слова:** многомерный анализ, диатомей, метод главных компонент, поверхностные пробы, ископаемые ассоциации

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.3.12

## ВВЕДЕНИЕ

Отложения дельты Волги представляют интерес для палеогеографических исследований в контексте колебаний уровня Каспийского моря. Диатомовый анализ – один из хорошо разработанных методов для изучения условий осадконакопления в водной среде, успешно применяемый для реконструкций положения береговых линий морей и озер [Santos-Fischer dos et al., 2016]. Детальные реконструкции на границе река/море возможны благодаря строгой экологической приуроченности диатомовых водорослей. Вместе с тем в мире насчитывается от 30 до 100 тыс. видов диатомей [Mann, Vanormelingen, 2013], что приводит к необходимости изучения региональной специфики современной альгофлоры. В четвертичном периоде не выявлено крупных эволюционных перестроек диатомей [Стрельникова, Гладенков, 2019], поэтому видовой состав совре-

менных диатомовых ассоциаций может служить основой для применения метода актуализма при палеоэкологических реконструкциях голоцена и плейстоцена дельты. Одним из факторов, усложняющих палеореконовструкцию в этом регионе, является сильная опресненность Северного Каспия, что препятствует однозначному разделению морских и пресноводных обстановок. Несмотря на длительную историю изучения колебаний уровня Каспия, диатомеям дельты Волги и Северного Каспия посвящено не так много работ [Караева, 1961, 1972; Жаковщикова, 1970; Лысенко и др., 2024; Berdnikova et al., 2023]. Результаты диатомового анализа поверхностных осадков дельтовых протоков, склонов бэровских бугров и пресноводных ильменей впервые представлены Е.И. Поляковой, Т.С. Ключиткиной и О.С. Олюниной в монографии «Каспийское море: Экстремальные гидрологические события», в раз-

деле 2.7 [Болгов и др., 2007]. В публикации отражено распределение диатомей по основным экологическим группам (пресноводные, солоноватоводные и солоноватоводно-морские) без детализации по видовому составу, также рассчитаны концентрации диатомей в осадках. Диатомеи западных подступных ильменей описаны в работе В.Ф. Бреховских с соавторами [2010].

Основной фокус исследований диатомей из современных водоемов сосредоточен на изучении альгофлоры как маркера экологических изменений в условиях антропогенной нагрузки и зарегулирования стока Волги [Лабунская, 1993; Абдуллаев и др., 2004, Лабунская, Бухарин, 2010]. В связи с этим одна из задач работы – изучение современных и ископаемых диатомей в дельте Волги для поиска наиболее близких по структуре диатомовых ассоциаций обстановок-аналогов.

Статистические методы главных компонент (PCA) и неметрического многомерного шкалирования (NMDS) предназначены для проецирования многомерных данных на плоскости с целью снижения размерности – выделения основных факторов, которые объясняют изменчивость признаков. Таксономический состав диатомей в каждом образце является примером многомерных данных. При графическом отображении поля точек в двухмерном пространстве PCA нацелен на наименьшее искажение корреляций между переменными (образцами), NMDS – на наименьшее искажение расстояний между ними [Сушко, 2020]. Оба метода широко применяются в контексте палеоэкологических реконструкций [Палагушкина и др., 2014; Pike et al., 2008; Espinosa et al., 2022]. В данной работе они применены с целью выявления видов-индикаторов современных местообитаний и уточнения палеореконструкций условий осадконакопления на основе метода актуализма.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования являются пробы из поверхностного слоя донных осадков водоемов дельты Волги, а также образцы ископаемого материала из отложений, вскрытых скважинами Роу-2016 и DM-1. На территории Дамчикского участка Астраханского биосферного заповедника в нижней части дельты отобраны все изученные пробы донных осадков и образцы из скважины DM-1, в привершинной части дельты – образцы из скважины Роу-2016 (рис. 1, табл.).

Пробы поверхностного слоя донных отложений отбирались в июне 2017 г. и сентябре 2018 г. Объекты опробования выбраны, исходя, в первую очередь, из различий в гидрологических характеристиках (длина, ширина, глубина) и их доступности

в пределах Дамчикского участка Астраханского заповедника. Также было важно отобрать образцы из проток разного порядка для выявления возможных различий в видовом составе диатомовых ассоциаций. Таким образом, выбраны следующие объекты: р. Быстрая (один из рукавов основного русла Волги, главная протока на территории Дамчикского участка); ерики Дубной (левый рукав р. Быстрая) и Лотосный (правый рукав р. Быстрая); две мелкие протоки в устьевых частях более крупных водотоков (Мартышка – в устьевой части ер. Дубного и безымянная – в устьевой части р. Быстрая); култук Сазаний; протока Грязнуха (см. табл.). Глубина отбора по техническим причинам фиксировалась только для образцов, отобранных в 2018 г.

Гидрологические характеристики р. Быстрой, ер. Дубного, пр. Мартышка и Грязнуха были получены с помощью акустического доплеровского профилографа и любезно предоставлены н. с. кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ к.г.н. П.Н. Терским. Глубина ер. Лотосного получена из публикации [Литвинова, Ключников, 2023]. Ширина и длина остальных объектов измерены дистанционными методами с использованием онлайн-сервиса «Google Планета Земля» и подложки спутниковых снимков сверхвысокого разрешения от 18.06.2019, наиболее близких по дате к периоду проведения полевых исследований [Google Earth, 2024].

Основные гидрологические характеристики изученных объектов:

- 1) р. Быстрая – ширина в пределах участка 40–180 м, в устьевой части – 30 м, глубина 4–8 м;
- 2) ер. Дубной – ширина 20–90 м, глубина до 3,9 м;
- 3) ер. Лотосный – ширина 10 м, глубина до 2,5 м.
- 4) култук Сазаний – длина около 2500 м, ширина от 80 до 300 м;
- 5) пр. Грязнуха, длина около 18000 м, ширина в южной части 1000–1500 м, в северной – до 7000 м; глубина около 1 м;
- 6) пр. Мартышка – ширина 20–25 м, глубина до 4 м;
- 7) безымянная протока – ширина 20–25 м.

В протоках при достаточной ширине русла (от 20 м) отбор производился по профилю: левый берег – стрежень – правый берег для выявления возможных локальных факторов влияния на видовой состав диатомовых ассоциаций. В наиболее мелководной и широкой протоке Грязнуха отобрано три образца: два – в расширенной части, один – в суженной части.

Отбор проб донных отложений производился с борта лодки с помощью малого дночерпателя системы Ван-Вина, что соответствует стандартной методике [Диатомовые водоросли СССР, 1974]. Мощность отбираемых слоев осадка составляла порядка 2–3 см. Образцы помещались в герметичные

пластиковые пакеты и фиксировались раствором формалина до появления слабого запаха. Всего отобрано и проанализировано 24 образца поверхностного слоя донных осадков.

Бурение скважины Роу-2016 (пос. Пойменный, см. табл.) производилось механизированным канатно-ударным способом. В ходе бурения отобраны образцы керна диаметром 15 см для целей комплексного анализа: они зачищались от материала, попавшего из верхних слоев при изъятии керна, после чего сле-

довала упаковка и этикетирование образцов с указанием номера и глубины. Часть керна в интервале 4,6–7,5 м утеряна в процессе бурения, ввиду сильной обводненности осадков. Выделение образцов для диатомового анализа происходило в камеральных условиях из центральной части упакованных образцов. Образцы отбирались из каждого литологического слоя с шагом 10 см из глин и суглинков, через 20–30 см – из песчаных отложений (см. табл.). Мощность отобранных образцов составила 1–2 см.

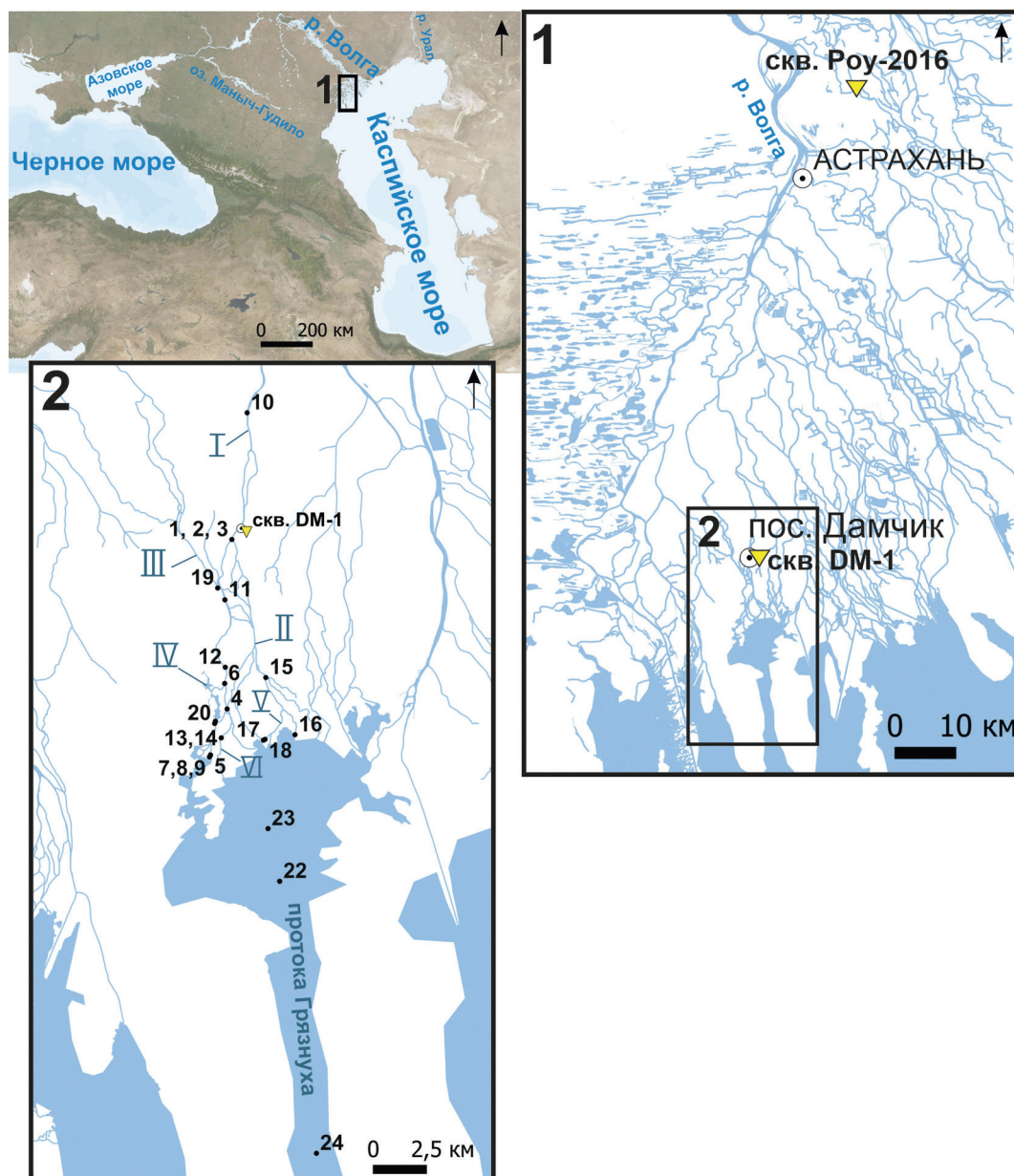


Рис. 1. Местоположение точек отбора проб поверхностного слоя донных отложений и ископаемого материала из скважин. На врезке 2 римскими цифрами обозначены следующие водные объекты: I – р. Быстрая; II – ер. Дубной; III – ер. Лотосный; IV – култук Сазаний; V – пр. Мартышка; VI – безымянная протока (рукав р. Быстрой)

Fig. 1. Locations of sampling points for the surface layers of bottom sediments and fossil material from boreholes. In insert 2 the following water objects are indicated by Roman numerals: I – Bystraya River; II – Dubnoy Erik; III – Lotosniy Erik; IV – Sazaniy Kultuk; V – Martyshka Channel; VI – unnamed channel (branch of the Bystraya River)

## Материалы исследования

| Поверхностные пробы донных отложений |                                                                                                                              |                         |                     |                                        |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------------------|
| № образца                            | Место отбора образца                                                                                                         | Расстояние от устья, км | Глубина отбора, м   | Координаты точек отбора                |
| 1                                    | Р. Быстрая (прав. берег)                                                                                                     | 11,57                   | 0,9                 | 45°47'8,740" с.ш., 47°52'59,340" в.д.  |
| 2                                    | Р. Быстрая (стрезень)                                                                                                        |                         | 4,9                 | 45°47'8,268" с.ш., 47°53'00,780" в.д.  |
| 3                                    | Р. Быстрая (лев. берег)                                                                                                      |                         | 1                   | 45°47'7,268" с.ш., 47°53'2,230" в.д.   |
| 4                                    | Р. Быстрая                                                                                                                   | 2,71                    | 2,7                 | 45°42'50,832" с.ш., 47°52'37,200" в.д. |
| 5                                    | Р. Быстрая (лев. берег)                                                                                                      | 0,27                    | 1,2                 | 45°41'41,748" с.ш., 47°51'57,636" в.д. |
| 6                                    | Р. Быстрая                                                                                                                   | 4,1                     | 1,3                 | 45°43'29,712" с.ш., 47°52'33,852" в.д. |
| 7                                    | Р. Быстрая (стрезень)                                                                                                        | 0,17                    | 2,2                 | 45°41'38,868" с.ш., 47°51'55,008" в.д. |
| 8                                    | Р. Быстрая (прав. берег)                                                                                                     |                         | 1                   | 45°41'39,010" с.ш., 47°51'54,530" в.д. |
| 9                                    | Р. Быстрая (лев. берег)                                                                                                      |                         | 1                   | 45°41'38,780" с.ш., 47°51'55,360" в.д. |
| 10                                   | Р. Быстрая                                                                                                                   | 17,8                    | –                   | 45°50'20,148" с.ш., 47°53'43,872" в.д. |
| 11                                   | Р. Быстрая                                                                                                                   | 8,24                    | –                   | 45°45'36,900" с.ш., 47°52'40,764" в.д. |
| 12                                   | Р. Быстрая                                                                                                                   | 4,66                    | –                   | 45°43'54,336" с.ш., 47°52'36,480" в.д. |
| 13                                   | Безымянная протока (рукав р. Быстрая; лев. берег)                                                                            | –                       | 0,5                 | 45°42'7,200" с.ш., 47°52'22,260" в.д.  |
| 14                                   | Безымянная протока (стрезень)                                                                                                | –                       | 2                   | 45°42'7,280" с.ш., 47°52'21,990" в.д.  |
| 15                                   | Ер. Дубной                                                                                                                   | –                       | 3,9                 | 45°43'36,516" с.ш., 47°54'3,636" в.д.  |
| 16                                   | Ер. Дубной (устьевая часть)                                                                                                  | –                       | –                   | 45°42'7,956" с.ш., 47°55'2,388" в.д.   |
| 17                                   | Пр. Мартышка (прав. берег)                                                                                                   | –                       | –                   | 45°42'1,368" с.ш., 47°53'53,592" в.д.  |
| 18                                   | Пр. Мартышка (рукав ер. Дубного; стрезень)                                                                                   | –                       | –                   | 45°42'2,592" с.ш., 47°53'57,084" в.д.  |
| 19                                   | Ерик Лотосный                                                                                                                | –                       | –                   | 45°45'55,224" с.ш., 47°52'26,184" в.д. |
| 20                                   | Култук Сазаний                                                                                                               | 0,04                    | 1,6                 | 45°42'29,448" с.ш., 47°52'9,048" в.д.  |
| 21                                   | Култук Сазаний                                                                                                               | 0,14                    | –                   | 45°42'32,760" с.ш., 47°52'10,632" в.д. |
| 22                                   | Пр. Грязнуха                                                                                                                 | 13,22                   | 0,9                 | 45°38'25,872" с.ш., 47°54'17,604" в.д. |
| 23                                   | Пр. Грязнуха                                                                                                                 | 13,48                   | –                   | 45°39'46,656" с.ш., 47°53'56,580" в.д. |
| 24                                   | Пр. Грязнуха                                                                                                                 | 0,42                    | –                   | 45°31'30,180" с.ш., 47°55'15,816" в.д. |
| Скважины в дельте Волги              |                                                                                                                              |                         |                     |                                        |
| № скважины                           | Место бурения                                                                                                                | Кол-во образцов         | Глубина скважины, м | Координаты скважин                     |
| DM-1                                 | Высокая пойма р. Быстрая, в 100 м к востоку от центральной усадьбы Дамчикского участка Астраханского биосферного заповедника | 20                      | 5,7                 | 45°47'21,71" с.ш., 47°53'23,62" в.д.   |
| Рou-2016                             | Русловая равнина на правобережье р. Рыча, в 2,5 км к северо-западу от центра пос. Пойменный                                  | 46                      | 15,0                | 46°28'4,64" с.ш., 48°9'43,54" в.д.     |

Материал для изучения ископаемых диатомей из керна скважины DM-1 отобран в ходе ручного бурения с тем же шагом отбора образцов, что и в скважине Рou-2016. Мощность отобранных отложений составляла 2–3 см, ввиду меньшего диаметра полученного керна (2,5 см).

Все полученные образцы изучены диатомовым методом, методом главных компонент (PCA) и методом неметрического многомерного шкалирования (NMDS).

**Диатомовый анализ.** Техническая обработка образцов для диатомового анализа проводилась по стандартным методикам [Диатомовые водоросли СССР, 1974; Smol et al., 2001] в НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена. Общее количество обработанных образцов ископаемого материала составило 66, образцов поверхностного слоя донных осадков из современных водоемов – 24.

Для изготовления постоянных препаратов использовалась смола NAPHRAX (показатель преломления 1,68). Таксономическое определение диатомей на основе изучения структуры их створок в постоянных препаратах произведено с помощью светового микроскопа JENVAL (Carl Zeiss) при увеличении в 1000 раз в НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена. В работе использован ряд определителей [Определитель..., 1951; Куликовский и др., 2016; Чудаев, Гололобова, 2016]. Актуальность названий таксонов контролировалась с помощью электронной базы данных Algaebase [Guiry, Guiry, 2024].

По результатам диатомового анализа образцов из поверхностного слоя современных донных отложений в вычислительной среде R построена пузырьковая диаграмма с таксонами, доля которых составляла от 1%. На диаграмме в обобщенном виде с помощью интервальной шкалы изображены доли видов диатомей в каждом образце. Результаты анализа ископаемых диатомей изображены в виде диаграмм распределения видов по глубине (в %), которые построены в программе Strater. Таксоны на данных диаграммах сгруппированы по жизненным формам диатомей на основе работы [Барина и др., 2006].

**Статистический анализ.** Выборки таксономического состава диатомей, полученные по результатам диатомового анализа ископаемого и современного материала, были подвергнуты статистической обработке с помощью метода главных компонент (PCA) и метода неметрического многомерного шкалирования (NMDS) в вычислительной среде R [Шитиков, Мاستицкий, 2017]. Для написания программного кода также использовались обучающие инструкции, находящиеся в открытом доступе [RPubs, 2024]. Подготовка данных включала в себя формирование матрицы в формате .csv с указанием точек отбора образцов, долей видов диатомей в образцах (%), местообитания (для диатомей из современных водоемов) или названия скважины (для ископаемых диатомей). В первую очередь статистической обработке подверглась выборка диатомей из поверхностного слоя донных осадков из современных водоемов. Это было необходимо для выделения экологических групп и основных видов-индикаторов местообитаний современных диатомей с целью дальнейшего применения метода актуализма. Для статистической обработки были выбраны виды, доля которых в образце составляла от 3%, так как наименее обильные таксоны оказывают сильное влияние на график ординации. Доля учитывалась без учета частоты встречаемости вида в образцах. То есть если вид обнаружен только в одном образце, но его доля

составила 3%, то он учитывался в PCA анализе. По результатам PCA построен график факторных нагрузок с ординацией исследованных образцов в осях значимых главных компонент. Далее с помощью PCA анализа была также изучена совокупная выборка, включающая современные и ископаемые диатомовые ассоциации, построен идентичный график ординации образцов для выявления схожести таксономического состава ассоциаций и уточнения палеореконструкций. Для упрощения визуализации на графике факторных нагрузок при совместном анализе современных и ископаемых диатомей выбраны те виды, доля которых в образце составляла от 5%.

По результатам NMDS также построен график ординации образцов с целью выявления наибольшего сходства/различия таксономического состава ископаемых и современных образцов для стратиграфического расчленения керна скважин и уточнения палеореконструкций. Для упрощения визуализации были выбраны только те виды, доля которых в образце составляла от 5%.

В скважинах, с опорой на литологические характеристики отложений, выделены зоны по диатомеям, характеризующие определенные этапы осадконакопления. Палеоэкологические реконструкции выполнены на основе диатомового анализа с учетом результатов статистических методов PCA и NMDS и литологических характеристик отложений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Результаты диатомового анализа.** В образцах поверхностного слоя донных отложений определено 155 таксонов диатомей. На пузырьковую диаграмму нанесены виды, доля которых составляет от 1% (рис. 2).

Во всех образцах поверхностного слоя донных отложений обильно представлены виды планктонных диатомей рода *Aulacoseira*: *A. granulata*, *A. ambigua*. В отдельных образцах из р. Быстрой, култука Сазаньего, ер. Лотосного и Дубного доля *A. granulata* достигает 80–90%, *A. ambigua* – 40–60%. Столь же высоких содержаний в отдельных образцах достигают: планктонный вид *Stephanodiscus minutulus* (60–80%) и перифитонный вид *Cocconeis lineata* (40–60%), встречающийся в обрастаниях высших водных растений (приурочен к образцам из пр. Грязнуха). Главная особенность структуры диатомовых ассоциаций из современных водоемов дельты – высокая доля планктонных диатомей в пробах донных осадков, что может быть результатом массового осадения створок.

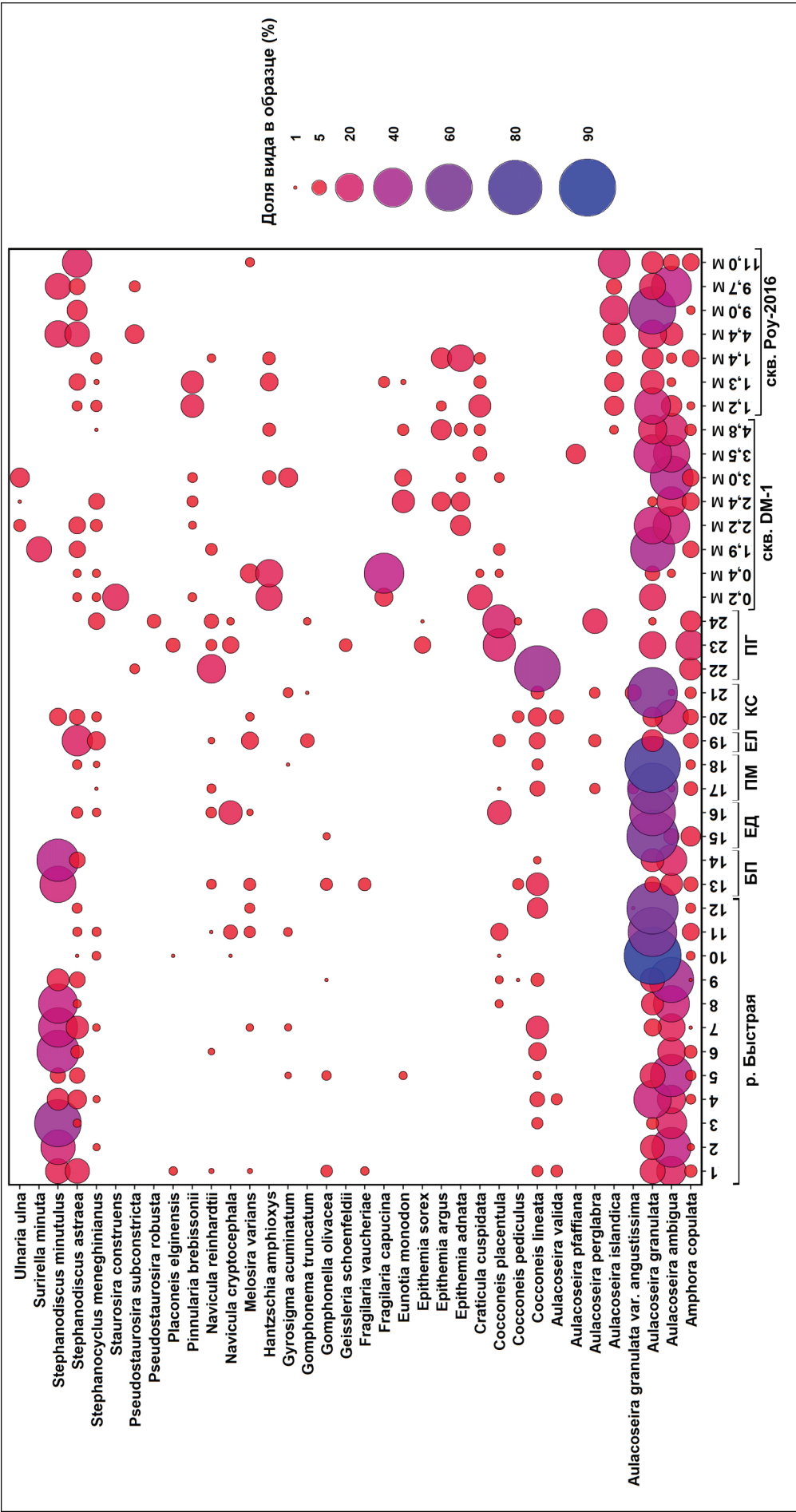


Рис. 2. Пузырьковая диаграмма, на которой изображено распределение видов в образцах поверхностного слоя донных отложений из современных водоемов и водотоков дельты Волги. Диаметр и цвет круга соответствуют определенному процентному содержанию вида. Буквенными индексами обозначены изученные объекты: БП – безымянная протока (рукав р. Быстрая), ЕД – ер. Дубной, ПМ – пр. Мартышка, ЕЛ – ер. Лотосный, КС – култук Сазаний, ПГ – пр. Грязнуха

Fig. 2. Bubble plot depicting the distribution of the common diatom species in the surface layer of bottom sediments from recent water bodies and channels of the Volga Delta. The size and colour of the bubbles indicate the relative abundance of each species. The studied objects are indicated by letter indices: БП – unnamed channel (branch of the Bystraya River), ЕД – Dubnoy Erik, ПМ – Martyshka Channel, ЕЛ – Lotosniy Erik, ПГ – Gryaznukha Channel

В скважине DM-1 (нижняя часть дельты) диатомеи обнаружены в 16 образцах. Количество створок, достаточное для статистической обработки и подробных палеорекопструкций, содержится в восьми образцах, в остальных образцах диатомеи представлены единичными створками или несколькими десятками створок (до 30). Всего выявлено 65 видов и внутривидовых таксонов. Таксоны с долей в образцах более 1% изображены на рис. 2, распределение наиболее обильных видов по разрезу скважины – на рис. 3.

В скважине Роу-2016 из привершинной части дельты диатомеи обнаружены только в 15 образцах. Количество створок, достаточное для статистической обработки и палеорекопструкций, содержится в семи образцах, в восьми образцах диатомеи представлены единичными створками. В разрезе скважины выявлено 108 видов, таксоны с долей в образцах более 1% представлены на рис. 2, распределение по разрезу наиболее обильных из них – на рис. 4.

В изученных скважинных отложениях так же, как и в современных, доминантами во многих образцах являются виды *Aulacoseira granulata* и *A. ambigua*, однако их преобладание не столь ярко выражено (максимум – до 60% у одного вида). Почти все выявленные таксоны относятся к пресноводным, за исключением единичных створок морских планктонных диатомей *Thalassiosira eccentrica* и *Thalassiosira hyperborea* из скважины DM-1. Согласно исследованиям П.И. Бухарицина и Е.Н. Лабунской [2023], каспийские виды встречаются в современном фитопланктоне низовий Волги, поэтому единичные находки диатомей рода *Thalassiosira* закономерны в отложениях дельты Волги.

**Результаты анализа главных компонент (PCA) современных диатомовых ассоциаций.** По результатам анализа главных компонент выборки диатомей из поверхностного слоя донных отложений современных водоемов, первые две компоненты объясняют 37,7% общей изменчивости, при этом наибольшая доля приходится на первую компоненту (24,8%; рис. 5). По-видимому, основной фактор формирования диатомовых ассоциаций – первая главная компонента – глубина водоемов. Положительные значения нагрузок по первой компоненте (положение в правой части графика) соответствуют прямой зависимости таксономического состава от значения фактора: чем выше значение фактора, тем больше диатомей определенных видов. Наибольшие положительные значения нагрузки по первой компоненте – у планктонных видов *Aulacoseira ambigua* и *Stephanodiscus minutulus*, отрицательные – у бентосных таксонов *Cocconeis placentula*, *Epithemia sorex*, *Geissleria schoenfeldii* и *Placoneis elginensis*. Последние тяготеют к образцам из пр. Грязнуха, которая отличается

наименьшей глубиной среди всех исследованных объектов (0,9 м). Виды с положительным знаком факторной нагрузки, наоборот, тяготеют к более глубоким водотокам. Данные таксоны по большей части приурочены к образцам из р. Быстрой – основного водотока на территории Дамчикского участка, отличающегося наибольшей глубиной среди изученных объектов (4–8 м).

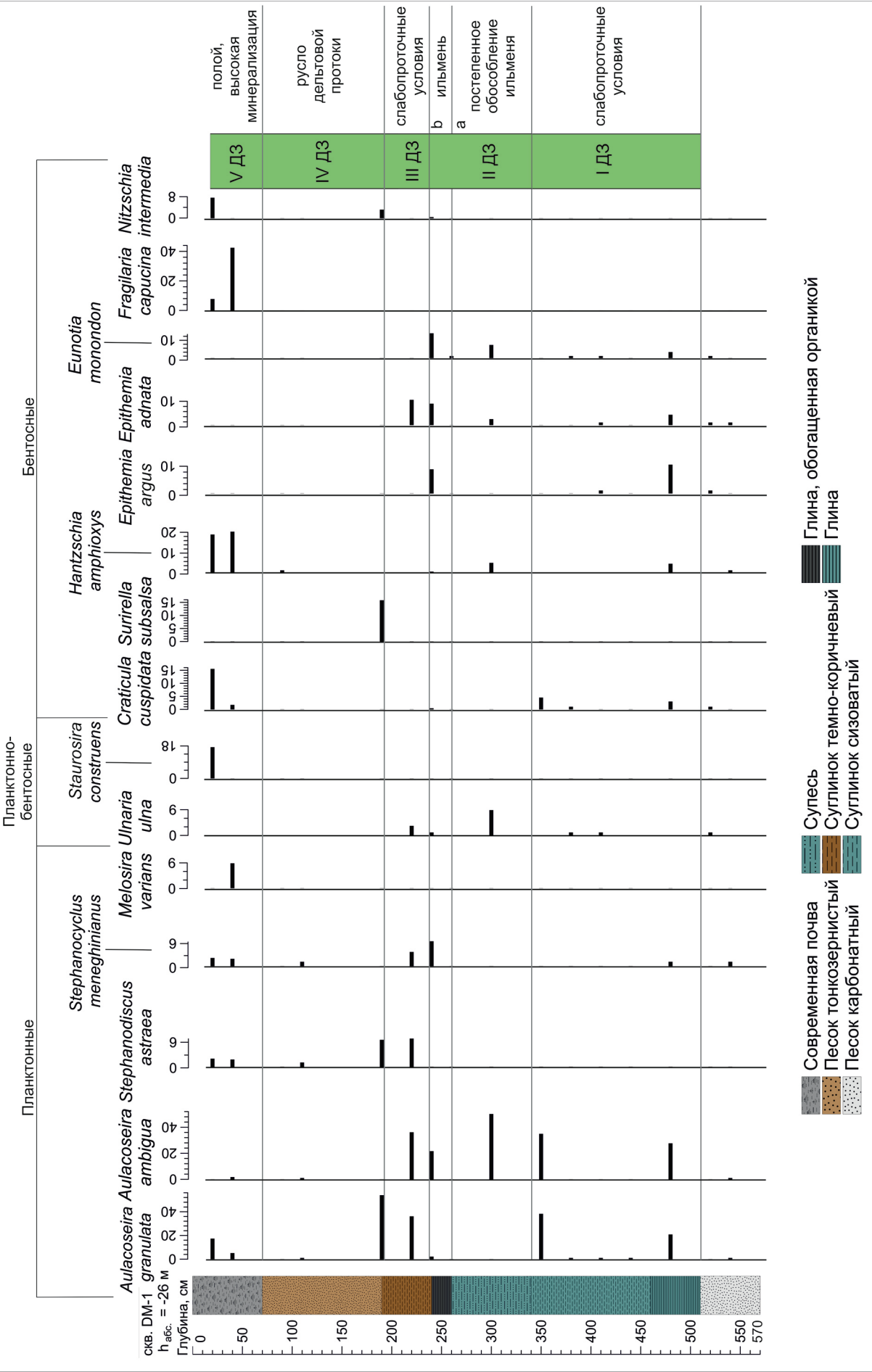
Наибольшее количество образцов поверхностного слоя донных отложений отобрано из р. Быстрой. По результатам диатомового анализа (см. рис. 2) основными преобладающими видами в данных образцах являются *Stephanodiscus minutulus*, *Aulacoseira ambigua* и *Aulacoseira granulata*. Перечисленные виды являются типичными для фитопланктона р. Волги [Бухарицин, Лабунская, 2023].

**Результаты статистических анализов ископаемых диатомовых ассоциаций и палеоэкологические реконструкции условий осадконакопления.** Методом PCA также проанализирована совокупная выборка образцов из современных водоемов и из скважин (рис. 6). Первые две компоненты объясняют существенно меньший процент дисперсии – 26,7%, что свидетельствует о сильных различиях между современными и ископаемыми диатомовыми ассоциациями. Тем не менее для отдельных образцов можно выявить некоторую схожесть с современными обстановками.

Результаты метода неметрического многомерного шкалирования (NMDS) для совокупной выборки образцов донных отложений из поверхностного слоя современных водоемов и образцов из скважин DM-1 и Роу-2016 представлены на рис. 7. Образцы скважины Роу-2016 более компактно располагаются на графике, что в целом свидетельствует о большем сходстве диатомовых ассоциаций и может говорить о меньшем контрасте в условиях осадконакопления, по сравнению со скважины DM-1.

Скважина DM-1. В осадках скважины на основе диатомового анализа с опорой на статистические данные и литологический состав осадков выявлено пять диатомовых зон (ДЗ) (см. рис. 3).

ДЗ I (5,0–3,4 м) выделена в толще сизоватых глин, переходящих в суглинки выше по разрезу, и содержит образцы с глубин 3,5 и 4,8 м. В ней преобладают планктонные виды *Aulacoseira granulata* и *A. ambigua*, их доли примерно равны и находятся в пределах 20–40%. Суммарная доля планктона увеличивается вверх по разрезу с 50 до 73%, что может говорить об увеличении глубины водоема или более проточном режиме, что подтверждается сменой литологического состава. По результатам PCA данные образцы расположены в противоположных участках графика относительно второго фактора (см. рис. 6).



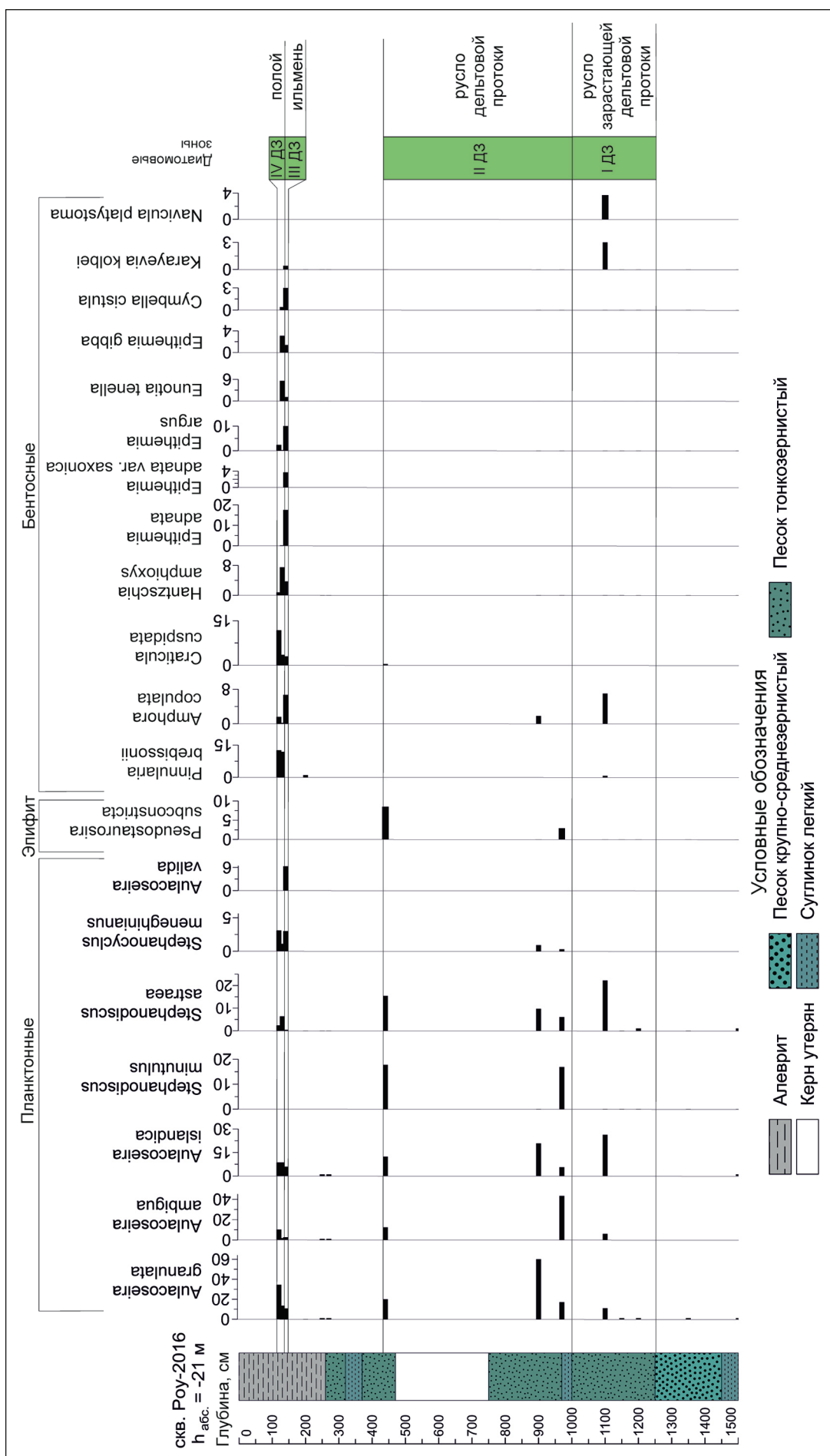


Рис. 4. Распределение наиболее обильных видов диатомей по разрезу скважины Poy-2016 (в %) и выделенные диатомовые зоны  
Fig. 4. Distribution of the most abundant diatom species in the Poy-2016 core (in %) and diatom zones identified in the core

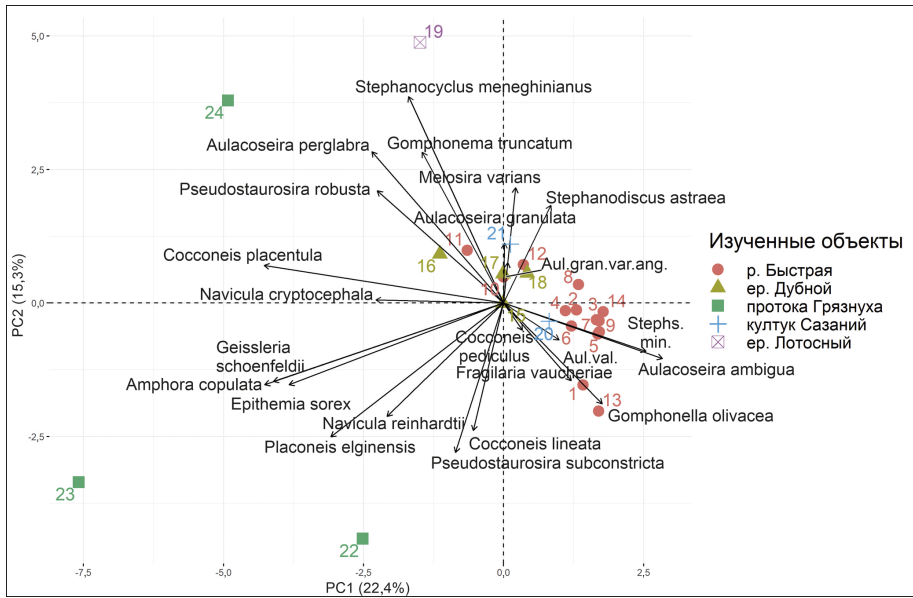


Рис. 5. Результаты PCA. График факторных нагрузок (стрелки) и ординация исследованных образцов в осях значимых главных компонент. Расшифровка нумерации точек указана в табл. Сокращены названия следующих видов: Aul.gran.var.ang – *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, Aul.val. – *Aulacoseira valida*, Stepsh.min. – *Stephanodiscus minutulus*

Fig. 5. PCA results. Graph of factor loadings (arrows) and ordination of the studied samples in the axes of significant principal components. The decoding of the samples' numbers is given in Table. The names of the following species are abbreviated: Aul.gran.var.ang – *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, Aul.val. – *Aulacoseira valida*, Stepsh.min. – *Stephanodiscus minutulus*

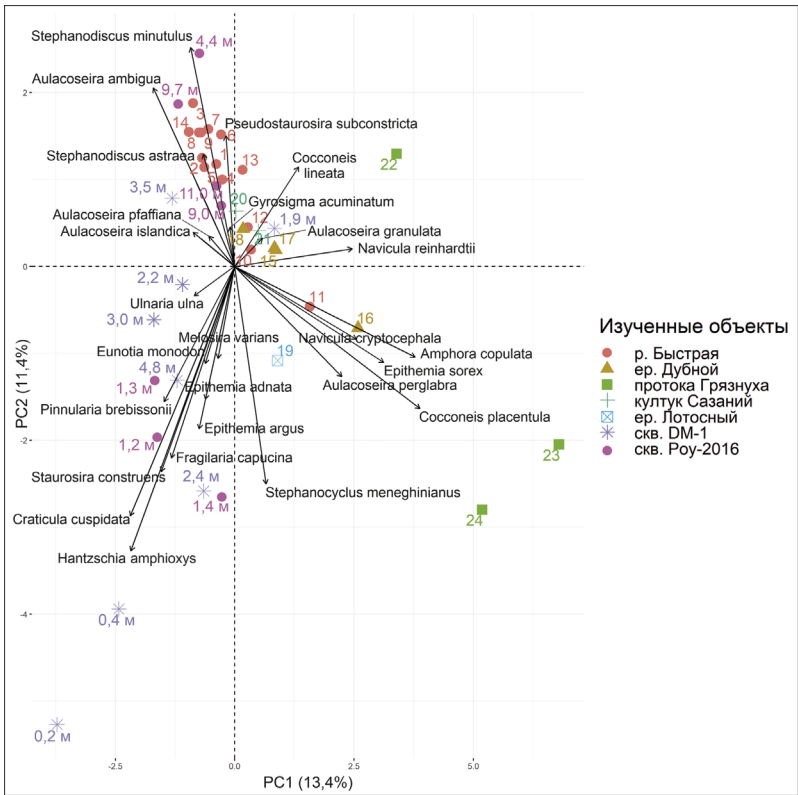


Рис. 6. График факторных нагрузок и ординация исследованных образцов в осях значимых главных компонент для материалов из современных водоемов и скважин DM-1 и Poy-2016. Расшифровка нумерации образцов из современных водоемов указана в табл. Нумерация образцов из скважин приведена в соответствии с глубинами отбора

Fig. 6. Graph of factor loadings and ordination of the studied samples in the axes of significant principal components for materials from modern water bodies and cores DM-1 and Poy-2016. The decoding of the numbers of samples from modern water bodies is given in Table. Numbers of samples from the cores are given in accordance with the sampling depth

Образец с глубины 3,5 м приближен к кластеру р. Быстрой, образец с глубины 4,8 м сильно отличается от современных ассоциаций, его важная особенность – повышенная доля диатомей родов *Epithemia* и *Eunotia*, характерных для озер и болот. Однако по результатам NMDS выявлено сходство данных образцов между собой и с таковым с глубины 2,2 м. Относительно остальных образцов из скважины они обладают более равномерным распределением видов-доминант (см. рис. 2, 3). Также методом неметрического шкалирования выявлена относительная близость обстановок к современным условиям дельтовой протоки (обр. № 4 из р. Быстрой). Однако глинистый и суглинистый состав отложений и присутствие створок озерно-болотных видов *Epithemia argus*, *E. adnata* и *Eunotia monodon* свидетельствует в пользу слабопроточных условий.

ДЗ II (3,4–2,4 м) выделена в толще сизоватых неоднородных супесей-суглинков, сменяющихся прослоем обогащенных органикой глин выше по разрезу. К этой зоне относятся образцы с глубин 3,0 и 2,4 м. Они характеризуются преобладанием планктонного вида *Aulacoseira ambigua*, доля которого закономерно уменьшается в глинистых отложениях с 50 до 22%, что может свидетельствовать о переходе к более спокойным гидродинамическим условиям осадконакопления. Суммарная доля планктона также уменьшается с 50 до 32%. По результатам PCA образцы находятся в одних и тех же частях графика относительно первого и второго факторов, не имеют сходств с современными обстановками, но также и не образуют единого кластера (см. рис. 6). Образец с глубины 2,4 м отличается повышенной долей диатомей родов *Epithemia* и *Eunotia*, характерных для озер и болот. Однако на графике ординации по результатам NMDS данные образцы образуют единый кластер и располагаются вблизи образцов из р. Быстрой. По литологии и видовому составу диатомей можно выделить две подзоны: *a* – постепенное обособление ильменя (супесчаные-суглинистые отложения, доля планктонных диатомей выше), *b* – условия замкнутого пресного водоема – ильменя (глинистые отложения, высокая доля озерно-болотных видов родов *Epithemia* и *Eunotia*).

ДЗ III (2,4–2,0 м) выделена в толще темно-коричневых суглинков, в нее входит образец с глубины 2,2 м. Для него характерны равные доли преобладающих видов *Aulacoseira granulata* и *A. ambigua* (по 36%) и высокая суммарная доля планктона – 82%. Наряду с этим отмечается повышенное содержание бентосного вида *Epithemia adnata* (10%). По результатам PCA образец приближен к таковым с глубин 3,0 и 3,5 м (см. рис. 6). На графике ординации по результатам NMDS подтверждается сходство образцов с глубин 2,2 и 3,5 м. Также (как было сказано выше) в этот кластер

попадает образец с глубины 4,8 м (рис. 7). Вероятно, осадок формировался в слабопроточных условиях, схожих с таковыми, выявленными в ДЗ I.

ДЗ IV (2,0–0,9 м) выделена в толще тонкозернистых песков с включениями битых и целых раковин пресноводных моллюсков, в нее входит образец с глубины 1,9 м. Преобладающий вид – *Aulacoseira granulata* (53%), субдоминант – бентосный вид *Surirella subsalsa* (15,8%). На графике факторных нагрузок (см. рис. 6) образец приближен к некоторым образцам из р. Быстрой, ерика Дубного и култука Сазаньего, но отличается повышенной долей бентосного вида *Navicula reinhardtii*. Согласно результатам NMDS, подтверждается близость образца к обстановкам р. Быстрой (кластер с доминантом *Aulacoseira granulata* в правой части графика). Судя по литологии (тонкозернистый песок) и результатам статистических методов, можно однозначно реконструировать условия осадконакопления в русле дельтовой протоки.

ДЗ V (0,9–0,0 м) выделена в песках, преобразованных почвенными процессами, с включениями карбонатов в верхней части толщи. К ней относятся образцы с глубин 0,2 и 0,4 м. Зона отличается иным составом доминирующих видов, преобладают бентосные виды: в нижней части толщи – *Fragilaria capucina* (42%), в верхней – *Staurosira construens* (17,3%). Субдоминантами являются *Hantzschia amphioxys* (17–18% соответственно), *Craticula cuspidata* (2–16% соответственно). Последний вид появляется при повышении минерализации, солевом стрессе [Stenger-Kovács et al., 2023]. Суммарная доля бентосных таксонов составляет 76–80%, что свидетельствует о малой глубине водоема. По результатам PCA образцы с глубин 0,2 и 0,4 м значительно отличаются от образцов из поверхностных проб и из скважины Роу-2016. Они образуют отдельный кластер (см. рис. 6), что также подтверждается результатами NMDS (см. рис. 7). Аналогов этих обстановок среди современных диатомовых ассоциаций не выявлено. Исходя из графиков по результатам статистических анализов, индикатор для данных обстановок – аэрофильный вид *Hantzschia amphioxys*, встречающийся в почвах [Spaulding et al., 2021]. Его присутствие свидетельствует о субаэральных условиях. Исходя из высокой доли бентосных диатомей и повышенного содержания *Craticula cuspidata* и *H. amphioxys*, можно предположить осадконакопление в условиях эфемерного водоема, возникающего при затоплении участка дельтовой равнины в половодье – полоя.

**Скважина Роу-2016.** В осадках скважины на основе диатомового анализа с опорой на статистические данные и литологический состав осадков выявлено четыре диатомовые зоны (см. рис. 4).

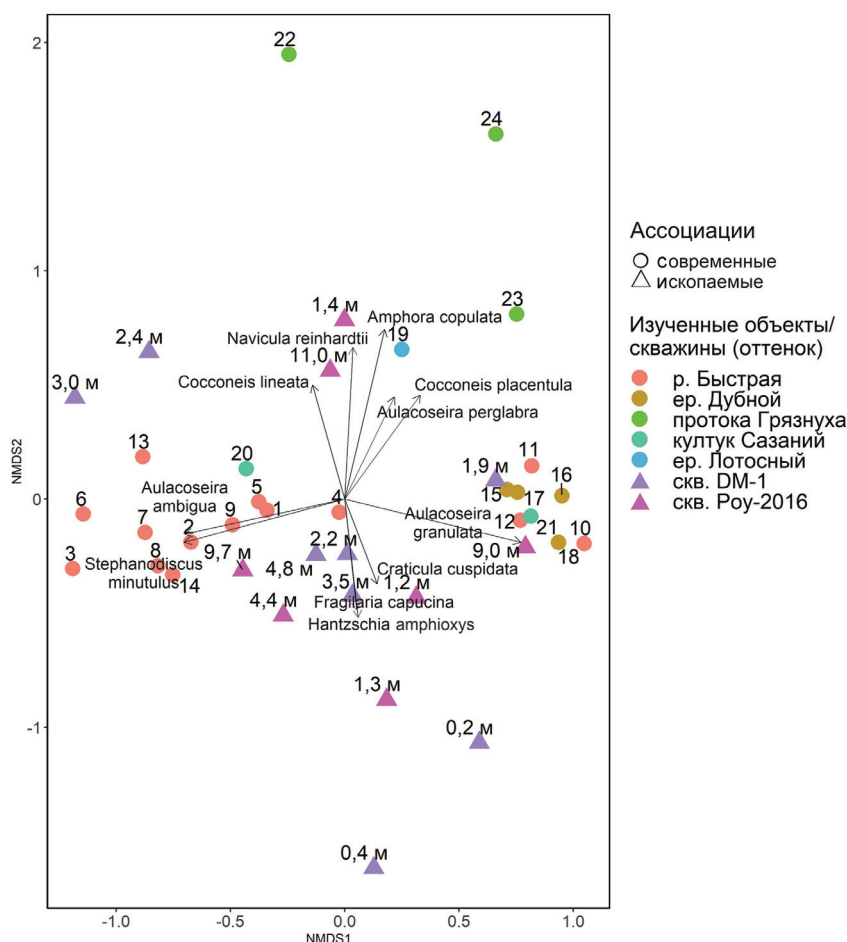


Рис. 7. График ординации образцов из скважин и современных водоемов дельты Волги по результатам NMDS. Расшифровка нумерации образцов из современных водоемов указана в таблице

Fig. 7. Ordination of the samples from cores and recent water bodies in the Volga Delta based on NMDS analysis. The decoding of the samples' numbers from modern water bodies is given in Table

ДЗ I (12,5–10,0 м) выделена в толще тонкозернистых песков, в нее входит образец с глубины 11,0 м. Он отличается отсутствием ярко выраженных доминант. Преобладают планктонные виды *Aulacoseira islandica* (26%) и *Stephanodiscus astraеа* (22%), суммарная доля планктона составляет 67%. Видовое разнообразие бентосных таксонов также довольно широкое (*Amphora copulata*, *Cymbella cistula*, *Navicula platystoma*, *Pinnularia brebissonii*). По результатам PCA данный образец входит в кластер р. Быстрой, а также приближен к образцам с глубин 4,4; 9,0; 9,7 м, что позволяет предположить осадконакопление в русле дельтовой протоки. Это отличается от результатов NMDS: на рис. 7 данный образец приближен к таковому с глубины 1,4 м и ассоциациям из ер. Лотосного, который представляет собой довольно узкую (10 м) протоку. Данные образцы характеризуются повышенной долей бентосного вида *Amphora copulata*, также встречающегося в обрастаниях. Это может свидетельствовать о формировании осадка в относительно узкой, зарастающей дельтовой протоке.

ДЗ II (10,0–4,4 м) – выделена условно в связи с утерей части обводненного материала при бурении на основе общности видового состава диатомовых ассоциаций выше и ниже утерянного интервала керна. В нижней части интервала отмечается прослой суглинков, сменяющийся мощной толщей однородных тонкозернистых песков выше по разрезу. К этой зоне относятся образцы с глубин 9,7; 9,0 и 4,4 м. В них доминируют створки планктонных видов рода *Aulacoseira* (45–81%), субдоминанты – *Stephanodiscus astraеа* (6–15%) и *S. minutulus* (17–18%). Суммарная доля планктона высокая – 80–90%, что в совокупности с литологическим составом свидетельствует о проточных условиях осадконакопления. По результатам PCA подтверждается схожесть данных ассоциаций между собой и с обстановками из р. Быстрой. Близость к ассоциациям из р. Быстрой также видна на графике NMDS (см. рис. 7): образец с глубины 9,0 м приближен к кластеру с доминантом *Aulacoseira granulata* (куда также попал образец с глубины 1,9 м из скважины

DM-1), остальные образцы тяготеют к кластеру с доминантами *Stephanodiscus minutulus* и *Aulacoseira ambigua*. Данные результаты позволяют однозначно реконструировать условия дельтовой протоки.

ДЗ III (1,4 м) выделена в суглинках с вкраплениями органического вещества, к ней отнесен один образец с глубины 1,4 м. Для зоны характерны иные доминанты: преобладают бентосные виды рода *Epithemia*: *E. adnata* (17%), *E. argus* (10%), также высока доля планктонного вида *Aulacoseira granulata* (11%). Суммарная доля планктона низкая – 20%. На графике по результатам PCA данный образец сильно отличается от таковых из современных обстановок и приближен к образцу с глубины 2,4 м из скважины DM-1 (см. рис. 6). График ординации, построенный по результатам NMDS, сообщает о близости образцов с глубин 1,4 и 11,0 м (см. рис. 7). Однако литологический состав отложений (суглинки), иной состав видов-доминант (*Epithemia adnata*, *Aulacoseira granulata*, *E. argus*) и в целом повышенная доля бентосных диатомей, в частности озерно-болотных видов рода *Epithemia*, позволяют реконструировать условия осадконакопления в мелком пресном водоеме – ильмене.

ДЗ IV (1,4–1,2 м) также выделена в толще суглинков, в верхней части которой отмечаются следы почвообразования. В эту зону входят образцы с глубин 1,3 и 1,2 м. Около 45% диатомей относится к роду *Aulacoseira* (доля *A. granulata* – 34%, *A. ambigua* – 10%). Представительными видами также являются бентосные таксоны *Pinnularia brebissonii* (12–13%), *Craticula cuspidata* (3–12%). Доля планктона увеличивается вверх по разрезу от 30 до 55%. По результатам PCA образцы сильно отличаются от современных обстановок по видовому составу диатомей, на графике ординации приближены друг к другу и к образцу с глубины 4,8 м из скважины DM-1. На графике ординации по результатам NMDS образцы с глубин 1,2 и 1,3 м также имеют сильные отличия от современных ассоциаций и образуют кластер вместе с образцами из ДЗ III в скважины DM-1. По-видимому, данный кластер отвечает условиям осадконакопления, для которых нет аналогов среди современных обстановок. Наряду с типичными для дельтовых протоков планктонными видами *Aulacoseira granulata* и *A. ambigua* наблюдается повышенная доля бентосных таксонов *Hantzschia amphioxys* (до 7,5%) и *Craticula cuspidata*, также выявленных в верхних горизонтах керн скважины DM-1. Это может говорить о формировании полонных условий периодического затопления территории. Ранее существовавший водоем (ильмень), обстановки которого реконструированы в ДЗ III, в ходе осадконакопления трансформировался в эфемерный – полон, су-

ществующий в периоды затопления участка дельтовой равнины в половодье.

## ВЫВОДЫ

Статистический анализ современных и ископаемых диатомовых ассоциаций дельты р. Волги выявил достоверные различия в видовом составе диатомей из поверхностного слоя донных отложений и скважинного материала, а также позволил выделить виды-индикаторы обстановок осадконакопления. Для изученного материала метод неметрического многомерного шкалирования позволяет более наглядно представить сходства/различия современных и палеобстановок осадконакопления по сравнению с методом главных компонент. Важную роль играет частота встречаемости видов диатомей в образцах и распределение видов в рамках одного образца. Таким образом, на графике ординации NMDS отражаются наиболее широко распространенные виды и ярко выраженные доминанты в рамках одного образца. При более равномерном распределении видов в образце индикаторы определенных обстановок, как правило, не отражаются на графике ординации. Поэтому для палеоэкологических реконструкций этот метод следует применять как вспомогательный.

Результаты диатомового и статистического анализов показали, что для данной территории виды родов *Epithemia* и *Eunotia* являются индикаторами обстановок замкнутых пресных водоемов (ильменей), существование которых подтверждается литологическим составом осадков. Аналогов этих обстановок среди изученных водных объектов в современной дельте не выявлено.

Наиболее поздние этапы осадконакопления, соответствующие верхней части отложений обеих скважин (пески и суглинки, затронутые процессами почвообразования), имеют наибольшие отличия от изученных современных обстановок осадконакопления, т. к. отвечают субаэральным условиям осадконакопления. Видами-индикаторами выявленных обстановок служат *Hantzschia amphioxys* и *Craticula cuspidata*.

По сравнению с ископаемым материалом, в некоторых образцах поверхностного слоя донных отложений из р. Быстрой, култука Сазаньего, ериков Лотосного и Дубного наблюдается резкое повышение доли планктонного вида *Aulacoseira granulata* (до 90%), что не характерно для более ранних обстановок осадконакопления. Это может быть связано с массовым осаждением створок данного вида в период отбора поверхностных проб, поскольку он является типичным доминантом в фитопланктоне Нижней Волги в августе и сентябре [Бухарицин, Лабунская, 2023].

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность П.Н. Терскому за предоставленные результаты измерений гидрологических характеристик проток дельты Волги. Работа выполнена в рамках госзадания НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121051100135-0.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдуллаев Х.Т., Курочкина Т.Ф., Исуев А.Р. Качественные показатели водорослей водоемов дельты Волги // Вестник ДГУ. 2004. Вып. 1. С. 44–47.
- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель Авив: PiliesStudio, 2006. 498 с.
- Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море: экстремальные гидрологические события / под ред. М.Г. Хубларяна. М.: Наука, 2007. 381 с.
- Бреховских В.Ф., Бухарицин П.П., Волкова З.В. и др. Экологические проблемы западных подступных ильменей дельты р. Волги // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16. № 43. С. 34–48.
- Диаомовые водоросли СССР (ископаемые и современные) / под ред. З.И. Глезер, А.П. Жузе, И.В. Макаровой и др. Т. 1. Л.: Наука, 1974. 403 с.
- Жаковщикова Т.К. Диаомовые водоросли в колонках донных отложений Каспийского моря // Докл. АН СССР. 1970. Т. 190. № 4. С. 915–918.
- Караева Н.И. Диаомовые водоросли обрастаний у западного побережья Каспийского моря // Тр. Инст. океанол. АН СССР. 1961. Т. 59. С. 108–117.
- Караева Н.И. Диаомовые водоросли бентоса Каспийского моря. Баку: Элм, 1972. 258 с.
- Куликовский М.С., Глуценко А.М., Генкал С.И. и др. Определитель диаомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 804 с.
- Лабунская Е.Н. Сапробиологическая оценка состояния вод низовий Волги по фитопланктону // Водные ресурсы. 1993. Т. 20. № 1. С. 12–18.
- Лабунская Е.Н., Бухарицин П.И. Современное состояние фитопланктона и качество воды низовий Волги и Северного Каспия // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. № 8. С. 136–138.
- Литвинова Н.В., Ключников Э.Р. Проточность ериков дельты Волги – экосистемная значимость, современные проблемы и сохранение на заповедной территории // Актуальные проблемы биоразнообразия и биотехнологии. Материалы II Международной научно-практической конференции. Астрахань: Астраханский гос. ун-т им. В.Н. Татищева, 2023. С. 114–116.
- Лысенко Е.И., Ткач А.А., Макишев Р.Р. и др. Палеоэкологические условия в преддельтовом районе Северного Каспия в голоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2024. № 1. С. 61–77. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.5.
- Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 4. Диаомовые водоросли / под ред. А.И. Прошкиной-Лавренко. М.: Советская наука, 1951. 621 с.
- Палагушкина О.В., Назарова Л.Б., Фролова Л.А. Диаомовые водоросли из голоценовых осадков озера Большой Харбей (Большеземельская тундра, Россия) // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2014. Т. 7. № 4. С. 395–410.
- Сушко Г.Г. Методы многомерного анализа данных в синэкологии насекомых // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2020. № 1. С. 38–45.
- Стрельникова Н.И., Гладенков А.Ю. Диаомовые водоросли и их использование в стратиграфических и палеогеографических исследованиях // Вопросы современной альгологии. 2019. Т. 2. № 20. С. 1–38.
- Чудаев Д.А., Гололобова М.А. Диаомовые водоросли озера Глубокого. М., 2016. 447 с.
- Berdnikova A.A., Lysenko E.I., Makshaev R.R. et al. Multidisciplinary Study of the Rybachya Core in the North Caspian Sea during the Holocene, *Diversity*, 2023, vol. 15, p. 150–170, DOI: 10.3390/d15020150.
- Espinosa M.A. FayóR., Vélez-Agudelo C. Diatom-based paleoenvironmental reconstruction from the coast of Northern Patagonia, Argentina, *Journal of South American Earth Sciences*, 2022, vol. 116, p. 1–14, DOI: 10.1016/j.jsames.2022.103874.
- Mann D.G., Vanormelingen P. An inordinate fondness? The number, distributions, and origins of diatom species, *Journal of eukaryotic microbiology*, 2013, vol. 60, no. 4, p. 414–420, DOI: 10.1111/jeu.12047.
- Pike J., Allen C.S., Leventer A. et al. Comparison of contemporary and fossil diatom assemblages from the western Antarctic Peninsula shelf, *Marine Micropaleontology*, 2008, vol. 67, no. 3–4, p. 274–287, DOI: 10.1016/j.mar-micro.2008.02.001.
- Santos-Fischer dos C.B., Correra I.C.S., Weschenfelder J. et al. Paleoenvironmental insights into the Quaternary evolution of the southern Brazilian coast based on fossil and modern diatom assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, vol. 446, p. 108–124, DOI: 10.1016/j.palaeo.2016.01.018.
- Smol J.P., Birks H.J., Last W.M. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators, Kluwer Academic Publishers: Alphen aan den Rijn, The Netherlands, 2001, 327 p.
- Spaulding S.A., Potapova M.G., Bishop I.W. et al. Diatoms.org: supporting taxonomists, connecting communities, *Diatom Research*, 2021, vol. 36(4), p. 291–304, DOI: 10.1080/0269249X.2021.2006790.
- Stenger-Kovács C., Béres V.B., Buczkó K. et al. Review of phenotypic response of diatoms to salinization with biotechnological relevance, *Hydrobiologia*, 2023, vol. 850, no. 20, p. 4665–4688.

### Электронные ресурсы

Бухарицин П.И., Лабунская Е.Н. Фитопланктон низовьев Волги и северной части Каспийского моря: монография. М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2023. 336 с. URL: [https://www.rgo.ru/sites/default/files/buharicin\\_p.i\\_labunskaya\\_e.n\\_monografiya\\_fitoplankton\\_nizovev\\_volgi\\_i\\_severnoy\\_chasti\\_kaspiyskogo\\_morya.pdf](https://www.rgo.ru/sites/default/files/buharicin_p.i_labunskaya_e.n_monografiya_fitoplankton_nizovev_volgi_i_severnoy_chasti_kaspiyskogo_morya.pdf) (дата обращения 19.02.2024).

Шитиков В.К., Мاستицкий С.Э. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. 2017. URL: [http://www.ievbras.ru/ecostat/Kiril/R/DM/DM\\_R](http://www.ievbras.ru/ecostat/Kiril/R/DM/DM_R) (дата обращения 19.12.2024).

Google Earth. URL: <https://earth.google.com/> (дата обращения 19.02.2024).  
Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2024, URL:

<https://www.algaebase.org/> (дата обращения 18.02.2024).  
RPubs, URL: <https://rpubs.com/KarolinaSzczena/862710>;  
<https://www.rpubs.com/RGrieger/545184> (дата обращения 18.02.2024).

Поступила в редакцию 25.02.2024

После доработки 25.01.2025

Принята к публикации 12.03.2025

## DIATOM ASSEMBLAGES IN THE SURFACE LAYER OF BOTTOM SEDIMENTS FROM THE VOLGA RIVER DELTA AND THEIR IMPORTANCE FOR PALAEORECONSTRUCTIONS

E.I. Lysenko

Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography,  
Engineer; e-mail: [lenobl1996@gmail.com](mailto:lenobl1996@gmail.com)

The study of the Caspian Sea level changes during the Holocene predetermines the interest to palaeogeographic reconstructions of sedimentary environments in the Volga River Delta. Diatom analysis has been for a long time used for the reconstruction of coastline positions of the seas and lakes. In our study diatom assemblages from the surface layer of bottom sediments in the lower delta water bodies with different hydrological characteristics are compared with fossil ones taken from the boreholes in the upper and lower delta. In order to identify diatom indicator species of recent habitats and improve the palaeoreconstructions of earlier sedimentary environments using the actualism method we applied the following statistical methods to samples of recent and fossil diatoms: principal component analysis (PCA) and non-metric multidimensional scaling (NMDS). Statistical analysis of diatoms from recent bottom sediments and sediments from two cores in the Volga River delta let us create a database for reliable palaeoreconstructions of the sedimentation stages in deltaic channels and low flow waters within the study area. In the upper part of both cores, which corresponds to the latest stages of sedimentation, species non-common for recent diatom habitats were identified, namely *Hantzschia amphioxys* and *Craticula cuspidata*, which are probably indicators of subaerial conditions. The environments of freshwater lakes (il'mens) having no analogues among the studied modern habitats were also identified in the boreholes' sediments, which was confirmed by their lithological composition. Species of *Epithemia* and *Eunotia* genera are indicators of these conditions. Compared with fossil material, we observed a sharp increase in the proportion of the planktonic species *Aulacoseira granulata* (up to 90%) in some samples of the surface layer of bottom sediments from the Bystraya River, the Sazaniy Kultuk, and the Lotosny and Dubnoy eriks. It might be a consequence of mass sedimentation of the species valves during the period of surface sampling.

**Keywords:** multidimensional analysis, diatoms, principal component analysis, surface samples, fossil assemblages

**Acknowledgements.** The author expresses sincere gratitude to P.N. Tersky who provided the results of measurement of the hydrological characteristics of the Volga Delta channels. The study was conducted under the state assignment of the Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography, Faculty of Geography, Moscow State University (no 121051100135-0).

## REFERENCES

- Abdullaev Kh.T., Kurochkina T.F., Isuev A.R. Kachestvennye pokazateli vodoroslei vodoemov del'ty Volgi [Qualitative indicators of algae in the Volga Delta reservoirs], *Vestnik DGU*, 2004, vol. 1. p. 44–47. (In Russian)
- Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. *Bioraznobrazie vodoroslei-indikatorov okruzhayushchei sredy* [Diversity of Algal Indicators in Environmental Assessment], Tel Aviv: PiliesStudio Publ., 2006, 498 s. (In Russian)
- Berdnikova A.A., Lysenko E.I., Makshaev R.R. et al. Multidisciplinary Study of the Rybachya Core in the North Caspian Sea during the Holocene, *Diversity*, 2023, vol. 15, p. 150–170, DOI: 10.3390/d15020150.
- Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Lyubushin A.A. *Kaspiiskoe more: ekstremal'nye gidrologicheskie sobytiya* [Caspian Sea: extreme hydrological events], M.G. Khublaryan (ed.), Moscow, Nauka Publ., 2007, 381 p. (In Russian)
- Brekhovskikh V.F., Bukharitsin P.P., Volkova Z.V., Labunskaya E.N. *Ekologicheskie problemy zapadnykh podstepnykh il'menei del'ty r. Volgi* [Environmental problems of the western sub-steppe ilmens of the Volga Delta], *Aridnye ekosistemy*, 2010, vol. 16, no. 43, p. 34–48. (In Russian)
- Chudaev D.A., Gololobova M.A. *Diatomovye vodorosli ozera Glubokogo* [Diatoms of the Glubokoye Lake], Moscow, 2016, 447 p. (In Russian)

- Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennyye)* [Diatoms of USSR (fossil and recent)], Z.I. Glezer, A.P. Zhuze, I.V. Makarova (eds.), vol. 1, Leningrad, Nauka Publ., 1974, 403 p. (In Russian)
- Espinosa M.A., Fayó R., Vélez-Agudelo C. Diatom-based paleoenvironmental reconstruction from the coast of Northern Patagonia, Argentina, *Journal of South American Earth Sciences*, 2022, vol. 116, p. 1–14, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103874>.
- Karaeva N.I. *Diatomovye vodorosli bentosa Kaspiiskogo morya* [Benthic diatoms of the Caspian Sea], Baku, Elm Publ., 1972, 258 p. (In Russian)
- Karaeva N.I. Diatomovye vodorosli obrastaniy u zapadnogo poberezh'ya Kaspiiskogo morya [Diatoms fouling off the western coast of the Caspian Sea], *Tr. Inst. Okeanol. AN SSSR*, 1961, vol. 59, p. 108–117. (In Russian)
- Kulikovskiy M.S., Glushchenko A.M., Genkal S.I., Kuznetsova I.V. *Opredelitel' diatomovykh vodorosley Rossii* [Identification book of diatoms in Russia], Yaroslavl, Filigran Publ., 2016, 804 p. (In Russian)
- Labunskaya E.N. Saprobologicheskaya otsenka sostoyaniya vod nizovii Volgi po fitoplanktonu [Saprobological assessment of the state of water in the Lower Volga River Region using phytoplankton], *Vodnye resursy*, 1993, vol. 20, no. 1, p. 12–18. (In Russian)
- Labunskaya E.N., Bukharitsin P.I. Sovremennoe sostoyanie fitoplanktona i kachestvo vody nizovii Volgi i Severnogo Kaspiya [Current state of phytoplankton and water quality in the Lower Volga River Region and the North Caspian], *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2010, no. 8, p. 136–138. (In Russian)
- Litvinova N.V., Klyuchnikov E.R. Protochnost' erikov del'ty Volgi – ekosistemnaya znachimost', sovremennyye problemy i sokhraneniye na zapovednoi territorii [Flow intensity of the Volga River delta eriks – ecosystem significance, modern problems and conservation within a protected area], *Aktual'nye problemy bioraznoobraziya i biotekhnologii*, 2023, p. 114–116. (In Russian)
- Lysenko E.I., Tkach A.A., Makshaev R.R. et al. Paleoeologicheskie usloviya v predel'tovom raione Severnogo Kaspiya v golotsene [Palaeoecological situation in pre-delta area of the North Caspian Sea during the Holocene], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2024, no. 1, p. 61–77, DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.5>. (In Russian)
- Mann D. G., Vanormelingen P. An inordinate fondness? The number, distributions, and origins of diatom species, *Journal of eukaryotic microbiology*, 2013, vol. 60, no. 4, p. 414–420, DOI: 10.1111/jeu.12047.
- Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR [Identification book of freshwater diatoms from USSR], M.M. Zabelina, I.A. Kisel'gov, A.I. Proshkina-Lavrenko et al. (eds.), Moscow, Sovetskaya Nauka Publ., 1951, 621 p. (In Russian)
- Palagushkina O.V., Nazarova L.B., Frolova L.A. Diatomovye vodorosli iz golotsenovykh osadkov ozera Bol'shoi Kharbei (Bol'shezemel'skaya tundra, Rossiya) [Diatoms of the Holocene sediments of the Bolshoy Kharbei Lake (Bolshezemel'skaya Tundra, Russia)], *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya*, 2014, vol. 7, no. 4, p. 395–410. (In Russian)
- Pike J., Allen C.S., Leventer A. et al. Comparison of contemporary and fossil diatom assemblages from the western Antarctic Peninsula shelf, *Marine Micropaleontology*, 2008, vol. 67, no. 3–4, p. 274–287, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2008.02.001>.
- Santos-Fischer dos C.B., Correra I.C.S., Weschenfelder J. et al. Paleoenvironmental insights into the Quaternary evolution of the southern Brazilian coast based on fossil and modern diatom assemblages, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, vol. 446, p. 108–124, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.01.018>.
- Smol J.P., Birks H.J., Last W.M. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators*, Kluwer Academic Publishers: Alphen an den Rijn, The Netherlands, 2001, 327 p.
- Stenger-Kovács C., Béres V.B., Buczkó K. et al. Review of phenotypic response of diatoms to salinization with biotechnological relevance, *Hydrobiologia*, 2023, vol. 850, no. 20, p. 4665–4688.
- Strel'nikova N.I., Gladenkov A.Yu. Diatomovye vodorosli i ikh ispol'zovanie v stratigraficheskikh i paleogeograficheskikh issledovaniyakh [Diatoms and their application in stratigraphic and paleogeographic studies], *Voprosy sovremennoi ekologii*, 2019, vol. 2, no. 20, p. 1–38. (In Russian)
- Spaulding S.A., Potapova M.G., Bishop I.W. et al. Diatoms. org: supporting taxonomists, connecting communities. *Diatom Research*, 2021, vol. 36(4), p. 291–304, DOI: 10.1080/0269249X.2021.2006790. (In Russian)
- Sushko G.G. Metody mnogomernogo analiza dannykh v sinekologii nasekomykh [Methods of multivariate data analysis in insect synecology], *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*, 2020, no. 1, p. 38–45. (In Russian)
- Zhakovshchikova T.K. Diatomovye vodorosli v kolonkakh donnykh otlozhenii Kaspiiskogo morya [Diatoms in sediment cores of the Caspian Sea], *Dokl. AN SSSR*, 1970, vol. 190, no. 4, p. 915–918. (In Russian)
- Web sources**
- Bukharitsin P.I., Labunskaya E.N. Fitoplankton nizov'ev Volgi i severnoi chasti Kaspiiskogo morya [Phytoplankton of the Lower Volga and Northern part of the Caspian Sea], Moscow, Russian Academy of Natural History, 2023, 336 p. URL: [https://www.rgo.ru/sites/default/files/buharicin\\_p.i.\\_labunskaya\\_e.n.\\_monografiya\\_fitoplankton\\_nizovev\\_volgi\\_i\\_severnoy\\_chasti\\_kaspiyskogo\\_morya.pdf](https://www.rgo.ru/sites/default/files/buharicin_p.i._labunskaya_e.n._monografiya_fitoplankton_nizovev_volgi_i_severnoy_chasti_kaspiyskogo_morya.pdf) (дата обращения 19.02.2024). (In Russian)
- Google Earth, URL: <https://earth.google.com/> (access date 19.02.2024).
- Guiry M.D., Guiry G.M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2025, URL: <https://www.algaebase.org/> (access date 18.02.2024).
- Shitikov V.K., Mastitskii S.E. Klassifikatsiya, regressiya i drugie algoritmy Data Mining s ispol'zovaniem R [Classification, regression and other data mining algorithms using R], 2017, URL: [http://www.ievbras.ru/ecostat/Kiril/R/DM/DM\\_R](http://www.ievbras.ru/ecostat/Kiril/R/DM/DM_R) (access date 19.12.2024). (In Russian)
- RPubs, URL: <https://rpubs.com/KarolinaSzczena/862710>; <https://www.rpubs.com/RGrieger/545184> (дата обращения 18.02.2024).

Received 25.02.2024

Revised 25.01.2025

Accepted 12.03.2025