
**ВДОЛЬБЕРЕГОВОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ НАНОСОВ В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ
ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА ТЯЖЕЛОЙ ФРАКЦИИ ПЕСКОВ
В ПРИБРЕЖНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ**

© 2023 г. В. М. Анохин^{a, b, *}, О. М. Виноградова^{a, **},
И. М. Пятов^{b, ***}, Д. С. Дудакова^{a, ****}

^aИнститут озероведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
“Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук”,
Санкт-Петербург, Россия

^bРоссийский Государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, Санкт-Петербург,
Россия

*E-mail: vladanokhin@yandex.ru

**E-mail: vinrozy@yandex.ru

***E-mail: vvvvv1a@mail.ru

****E-mail: judina-d@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.09.2023 г.

После доработки 28.09.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

С целью выявления направлений перемещения прибрежных отложений Ладожского озера был проведен отбор проб песка на всех типах его берегов и выделение тяжелой фракции методом шлиховой промывки. В ходе анализа шлихов под микроскопом оценивались минеральный состав, крупность и окатанность частиц шлиха – признаки, характеризующие степень переработки прибрежных осадков. К полученным цифровым данным применены два вида статистического анализа – кластерный и факторный. Выделено 4 кластера со сходными степенями переработки исходного материала, которые на основании результатов факторного анализа ранжированы по относительной дальности переноса от незначительной до весьма значительной. Максимальное количество шлихов с малыми дальностями переноса тяготеет к северным берегам озера, что объясняется расположением здесь коренных берегов – основных источников обломочного материала в озере. Шлихи с максимальными дальностями переноса относительно равномерно распределены по всем берегам озера. Анализ результатов показал, что на всех участках побережья существует перенос тяжелой фракции донных отложений в определенном направлении: на южном берегу – на запад, на западном – на север, на северном – на восток и на восточном – на юго-восток. Это позволяет сделать вывод о существовании долговременной тенденции переноса прибрежных отложений вдоль берегов Ладожского озера в направлении по часовой стрелке.

Ключевые слова: береговая зона, Ладожское озеро, прибрежные отложения, тяжелая фракция, кластерный анализ, факторный анализ, направление переноса

DOI: 10.31857/S0869607123030023, EDN: YJCHYO

ВВЕДЕНИЕ

Береговая зона озер охватывает, с одной стороны, часть акватории водоема, в которой на дно активно воздействуют прибрежные гидродинамические процессы, и, с

другой стороны, часть прибрежной суши, где в формах рельефа и отложениях прослеживается влияние озерных процессов (обычно это граница максимального штормового заплеска).

Исследования гидродинамических процессов и тесно связанных с ними литологических характеристик и процессов береговой зоны исключительно важны для оценки и мониторинга состояния, в частности, прибрежных экосистем.

Ладожское озеро и его береговая зона являются предметом изучения ряда научных организаций. На протяжении многих десятилетий проводились, в частности, исследования береговых отложений озера [1, 8–10]. В частности, ученые ВНИИ Океангеология в 1995 г. опубликовали результаты своих исследований донных отложений Ладожского озера, в том числе его береговой зоны, в сборнике “Геоэкология Ладожского озера” [8], где были даны общие характеристики распространения донных отложений в прибрежной зоне и проведена предварительная общая типизация берегов. Довольно подробно описана геоморфология и происхождение береговой зоны Ладоги в монографии “Ладога” [9], содержащей результаты многолетних исследований сотрудников института Озероведения РАН. Эта же организация в следующей публикации [10] продолжила обобщение результатов изучения морфологии и донных отложений Ладожского озера, в том числе его берегов. А.В. Амантов подробно рассмотрел историю образования и развития котловины Ладожского озера, включая его границы, т.е. береговую зону [1].

В то же время исследований конкретно береговой зоны и ее отложений авторы не обнаружили. Состав и свойства песчаных частиц тяжелой фракции в береговых отложениях Ладоги изучались весьма отрывочно и не охватывали всего периметра береговой области.

В полевые сезоны 2015–2019 гг. сотрудниками Института озероведения РАН были проведены исследования береговой зоны Ладожского озера, которые включали, в частности, отбор проб для выделения тяжелой фракции прибрежных осадков [2, 4, 5, 12, 13].

В 2020–2021 гг. были опубликованы предварительные результаты данного исследования, по 18-ти точкам опробования, распределенным по всем берегам озера [3, 6, 11]. В данной публикации обобщены данные уже по 38-и точкам.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА

Береговая зона Ладожского озера имеет ряд характерных особенностей, среди которых следует отметить следующие.

На северном побережье, сложенном коренными породами, преобладают берега фиардово-шхерного типа. Западное побережье, сложенное в основном псефитовыми отложениями, характеризуется господством абразионно-аккумулятивного типа берегов. Южный берег озера в значительной степени является пляжем, весьма существенно заросшим крупными растениями – макрофитами, заросли которых в основном и определяют его облик, что подтверждается космическими данными и данными воздушной съемки с беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) [4, 12]. На восточном берегу при движении с юго-востока на северо-запад прослеживается последовательная смена типов берегов: песчаные пляжи сменяются валунными абразионно-аккумулятивными и далее фиардово-шхерными берегами [4, 12].

Исследовались рыхлые отложения на всех этих типах берегов.

Методика отбора шлиховых проб соответствовала традиционным методам [7] и сводилась к промывке рыхлых отложений промывочным лотком с выделением тяжелой песчаной фракции (шлиха). Проба начальным весом около 20 кг отбиралась из прибрежных песков до 1 м от уреза воды. Шлих сознательно не домывался для сниже-

ния потерь частиц, способных дать информацию (что привело к значительному содержанию кварца в шлихе).

Минеральный состав, крупность, окатанность частиц шлихов изучались под микроскопом при 80–100 кратном увеличении. Обработка и анализ проб тяжелой фракции прибрежных осадков проводились по 38 точкам, распределенным по всей береговой линии Ладожского озера.

Первичная обработка результатов микроскопического исследования проводилась с помощью пакета EXCEL. Были составлены диаграммы с информацией о составе, крупности и окатанности частиц тяжелой фракции. Эти диаграммы были вынесены на схему Ладожского озера с привязкой каждой диаграммы к точке отбора соответствующей пробы (рис. 1).

Для анализа данных по пробам тяжелой фракции прибрежных осадков Ладожского озера также был использован аппарат многомерной статистики (кластерный и факторный анализы пакета STATISTICA).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав шлиховых проб береговой зоны Ладожского озера представлен следующими минералами: кварц, магнетит, гранат, реже – полевой шпат, слюда, сульфиды (пирит и халькопирит) и частицами пород: обломки гранитоидов и частицы глин в разных комбинациях и пропорциях.

Самыми распространенными минералами в исследуемых шлихах являются кварц, магнетит и гранат. Средние величины их содержания в пробах составляют, соответственно, 49, 27 и 14%. В 21 пробе содержание кварца, магнетита и граната суммарно превышает 95%.

Кварц обнаружен на всех станциях. На 27 станциях (56% от общего числа станций) кварц является преобладающим над каждым из остальных минералов. Магнетит присутствует на всех станциях, кроме ЮЛ15-1. Диапазон изменения содержания магнетита довольно велик. На 4 станциях содержание магнетита превышает 50% и он преобладает над кварцем. Зерна граната отмечены в шлихах всех исследуемых станций в значительно меньших количествах, чем кварц и магнетит.

Пирит и халькопирит обнаружены на 6 станциях, их содержание не превышает 3%. Обычно они наблюдаются в пробах вместе. Слюда встречается в 14 пробах, ее количество составляет первые проценты (максимум – 10%). Полевой шпат присутствует в составе почти трети из отобранных шлихов, максимальное его содержание (10%) отмечено на 4 точках восточной – юго-восточной части озера. Голубая глина представлена в шлихе в единственной точке ЮЛ15-1, ее содержание составляет 60%. Гранитоиды определены в 10 шлихах в количестве 4–30%.

Станция ЮЛ15-1 резко отличается от прочих. При минимальном из всех остальных проб содержании главного компонента шлиха – кварца (10%), полном отсутствии магнетита (единственная станция), максимальном содержании полевого шпата (10%), и значительном содержании гранитоидов (15%), глина составляет 60%. На других станциях глинистые частицы не наблюдались. Следует отметить, что крупность всех компонентов шлиха данной станции выше, чем на других станциях.

Крупность отдельных зерен минералов в пробах варьирует в довольно широких пределах. Однако 80% исследуемых шлихов имеет среднее значение крупности пробы менее 1 мм. Экстремальные значения средней крупности проб составляют, соответственно, 0.32 и 2.1 мм. Окатанность минеральных зерен в шлихах может быть плохой, средней и хорошей.

Исключительные размеры Ладожского озера обуславливают большое разнообразие типов строения берегов, которые объединяются в районы по типологическому сходству (см. раздел “Объект и методика”)

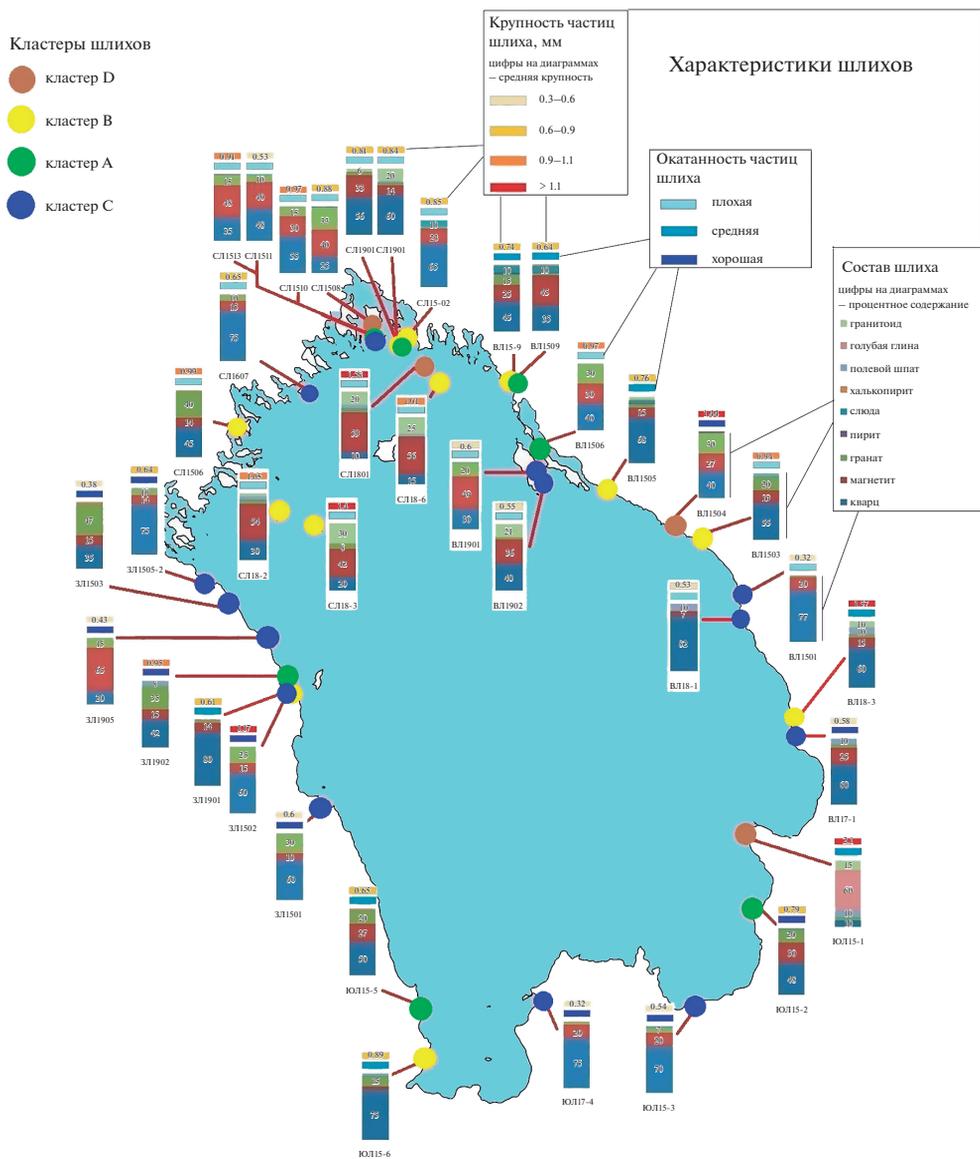


Рис. 1. Характеристики тяжелой минеральной фракции песчаных отложений на берегах Ладожского озера. В каждой колонке: верхний прямоугольник – крупность частиц шлиха, мм; ниже – окатанность; ниже – состав шлиха; ниже – номер станции. Процентное содержание указано для компонентов шлиха, значение которых более 5%.

Fig. 1. Characteristics of the heavy mineral fraction of sands on the shores of Lake Ladoga. In each column: the upper rectangle is the particle size of heavy minerals, mm; below – particle roundness; below – the composition of the heavy mineral fraction; below is the station number. Percentage is given for components with a value greater than 5%.

В табл. 1 представлены средние характеристики шлиховых проб по четырем структурно-геоморфологическим районам береговой зоны Ладожского озера.

Таблица 1. Средние характеристики шлиховых проб по районам береговой зоны Ладожского озера
Table 1. Average characteristics of concentrates in the regions of the coastal zone of Lake Ladoga

	район береговой зоны			
	северный	восточный	южный	западный
Содержания, %				
Кварц	43	62	64	55
Магнетит	33	19	23	22
Гранат	14	11	11	21
Пирит	0	1	0	0
Слюда	2	0	1	0
Халькопирит	0	0	0	0
Полевой шпат	1	6	0	2
Голубая глина	0	0	1	0
Гранитоид	6	2	0	0
Средняя крупность	0.84	0.9	0.94	0.76
Средняя окатанность	2.17	2.24	2.56	2.58

Южный и восточный районы имеют схожие характеристики содержания основных компонентов шлихов (кварц, магнетит, гранат), но для восточного района характерно также присутствие в пробах полевого шпата. Северное побережье имеет самый большой диапазон изменчивости минералогического состава шлихов от станции к станции. В шлихах данного района содержание кварца снижено по сравнению с остальными районами, но отмечается высокое содержание магнетита и присутствие значительного количества частиц гранитоида в шлихах. Шлихи западного побережья практически полностью состоят из зерен кварца, магнетита и граната. Количество кварца в пробах чуть больше половины, а содержание граната и магнетита практически одинаково. В шлихах присутствует полевой шпат в малом количестве.

Для анализа исходных данных были применены два метода кластерного анализ: иерархический метод Уорда с использованием Евклидовой метрики и метод К-средних.

Разбиение на кластеры, полученное методом Уорда, представлено в виде дендрограммы (рис. 2). В результате анализа полученной дендрограммы в качестве оптимального был выбран вариант разбиения на 4 кластера (linkage distance <6).

Следует отметить, что выделенные кластеры хорошо дифференцированы. Это указывает на существенные различия между ними. В качестве исходных признаков при проведении кластерного анализа шлиховых проб использовались суммарные значения процентного содержания в пробе стойких к истиранию минералов (кварца, магнетита и граната), средние значения крупности и окатанности проб. Указанные исходные признаки характеризуют степень переработки прибрежных осадков. Следовательно, можно утверждать, что станции внутри отдельных кластеров имеют сходную степень переработки исходного материала, которая существенно отличается от аналогичного параметра, характерного для станций других кластеров. На рис. 1. цвет точки станции указывает на ее принадлежность к тому или другому кластеру.

Результаты применения кластерного анализа методом К-средних для проб тяжелой фракции отложений береговой зоны Ладожского озера приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, результаты кластерного анализа, выполненного обоими методами, согласуются между собой. Исключение составляют две станции (ЗЛ1502 и СЛ15-02), отнесенные методом Уорда к кластеру 2.

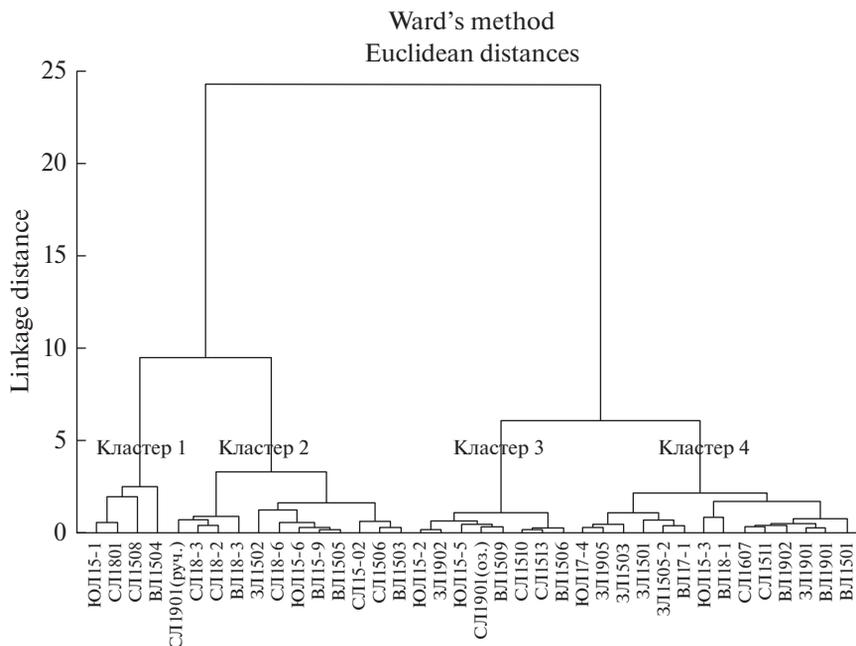


Рис. 2. Дендрограмма кластерного распределения станций отбора проб.

Fig. 2. Dendrogram of the cluster distribution of sampling stations.

Соответствие кластеров, полученных различными методами кластерного анализа приводятся в табл. 3.

Таблица 2. Состав кластеров по результатам кластерного анализа методом К-средних
Table 2. Composition of clusters based on the results of cluster analysis using the K-means method

Кластер А	Кластер В	Кластер С	Кластер D
ВЛ1506	ВЛ1503	ВЛ1501	ВЛ1504
ВЛ1509	ВЛ1505	ВЛ17-1	СЛ1508
ЗЛ1502	ВЛ15-9	ВЛ18-1	СЛ1801
ЗЛ1902	ВЛ18-3	ВЛ1901	ЮЛ15-1
СЛ1513	СЛ1506	ВЛ1902	
СЛ15-02	СЛ18-2	ЗЛ1501	
СЛ1510	СЛ18-3	ЗЛ1503	
СЛ1901(оз.)	СЛ18-6	ЗЛ1505-2	
ЮЛ15-2	СЛ1901(руч.)	ЗЛ1901	
ЮЛ15-5	ЮЛ15-6	ЗЛ1905	
		СЛ1511	
		СЛ1607	
		ЮЛ15-3	
		ЮЛ17-4	

Таблица 3. Соответствие кластеров, полученных различными методами кластерного анализа
Table 3. Correspondence of clusters obtained by different methods of cluster analysis

Метод анализа	Обозначение кластера			
Метод Уорда	1	2	3	4
Метод К-средних	D	B	A	C

На основании матрицы дистанций (distance matrix), полученной в результате разложения на кластеры методом Уорда, с использованием факторного анализа была построена ординация станций пробоотбора в пространстве 2-х главных факторов (они описывают 88.35% исследуемой дисперсии), представленная на рис. 3.

Здесь надо отметить, что ординация с весьма схожими характеристиками была получена при предварительном анализе 18-ти первых проб из числа проанализированных здесь [11]. Таким образом, увеличение данной выборки не привело к искажению результатов, что, на взгляд авторов, свидетельствует о достоверности этих результатов.

При анализе главных факторов было установлено, что фактор 1 имеет обратную связь с процентным содержанием стойких к истиранию минералов в пробе и прямую связь с крупностью частиц. То есть, высокое значение фактора 1 характеризуют малую степень переработки наносов. В свою очередь, фактор 2 имеет прямую связь с окатанностью, и, следовательно, высокие значения фактора 2 указывают на значительную степень переработки наносов.

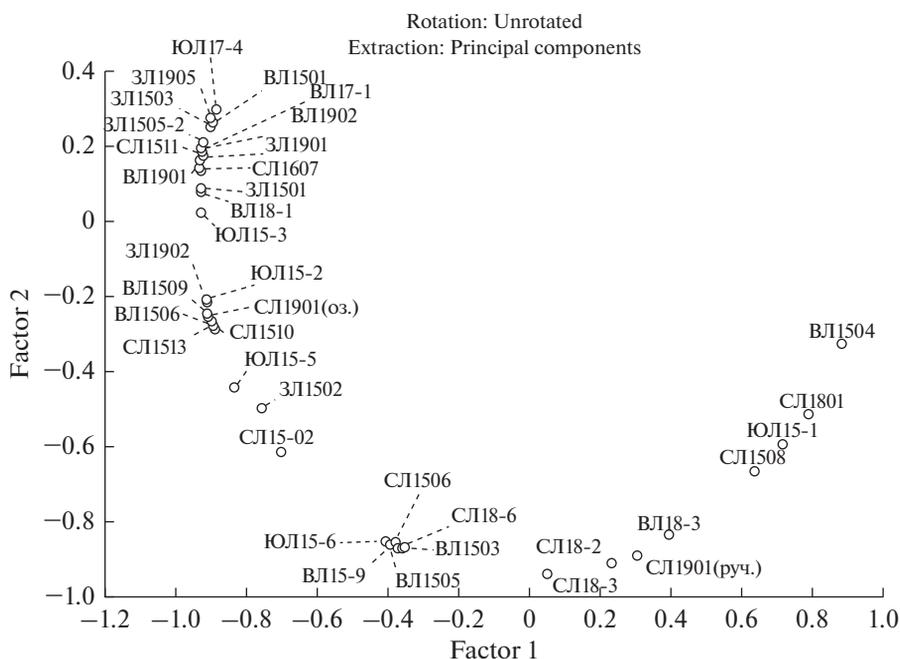


Рис. 3. Ординация станций пробоотбора в пространстве 2-х главных факторов.

Fig. 3. Ordination of sampling stations in the space of 2 main factors.

Основываясь на результатах факторного анализа можно сделать вывод, что наибольшая степень переработки материала характерна для шлиховых проб станций кластера С. Пробы станций, отнесенных к этому кластеру, имеют высокое процентное содержание стойких к истиранию минералов, малую крупностью и высокую окатанность частиц. Пробы станции из кластера А имеют схожие характеристики (за исключением меньшей степени окатанности). Можно сделать вывод о невысокой степени переработки материала шлиховых проб кластеров В и особенно D. Отложения станций, входящих в кластер D, подверглись незначительной переработке, и, следовательно, находятся в непосредственной близости от источника поступления обломочного материала в береговую зону.

Итак, по характеристикам вещественного состава, крупности и окатанности шлихи распределяются по 4-м кластерам, каждый из которых связан с относительной дальностью переноса тяжелой фракции из данного шлиха.

При этом кластер D связан с наименьшей дальностью переноса, В – с несколько большей дальностью переноса, А – с довольно большой дальностью переноса, С – с максимальной дальностью переноса.

Необходимо отметить, что кластеры С и А достаточно однородны, а диапазон характеристик станций кластеров В и D весьма значителен.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты изучения минералогического состава, крупности и окатанности частиц тяжелой фракции (включая результаты статистического анализа) прибрежных отложений Ладожского озера указывают на весьма высокую вероятность существования долговременного вдольберегового переноса этих отложений, направленного по часовой стрелке. Распространение кластеров тяжелой фракции береговых отложений Ладожского озера показывает следующее (рис. 4).

1. Максимальное количество шлихов с малыми дальностями переноса (кластеры D и В) тяготеет к северным берегам озера, что и не удивительно, т.к. основными источниками обломочного материала в озере являются коренные берега в его северной части. Единичные случаи расположения шлихов кластера D в других частях береговой зоны явно связаны с локальными источниками сноса, представляющими собой моренные гряды, выступающие над поверхностью воды – в районе мыса Стороженский (станция ЮЛ 15-1), в бухте Петрокрепость (станция ЮЛ 15-6), и на восточном берегу озера (станция ВЛ 15-04). Разумеется, реальное количество локальных источников сноса на берегах Ладоги должно быть значительно больше, но существующие данные пока указывают на эти три.

2. Шлихи с максимальными дальностями переноса (кластеры А и С) более или менее равномерно распределены по всем берегам озера. Это может указывать на существование как а) собственно дальнего переноса от источников сноса в северной части озера в сторону южной его части, так и б) столь же длительного, но по фактическому расстоянию недалекого переноса, вызванного сложной системой долгоживущих придонных течений у фиардово-шхерных северных берегов, имеющих высокую степень изрезанности.

Некоторое тяготение шлихов кластера С к западному берегу южнее Приозерска может быть вызвано подпиткой тяжелой фракции переносом с востока на запад по локальной линии берегового переноса от многочисленных источников обломочного материала на северном побережье озера.

Динамика кластеров на отдельных участках берега, связанных с локальными источниками сноса, выявляет следующие местные тенденции переноса тяжелой фракции.

1. От мыса Стороженского (станция ЮЛ 15-1, ближайший перенос) на ЮЗ прослеживается последовательная цепочка с увеличением дальности переноса: от кластера D

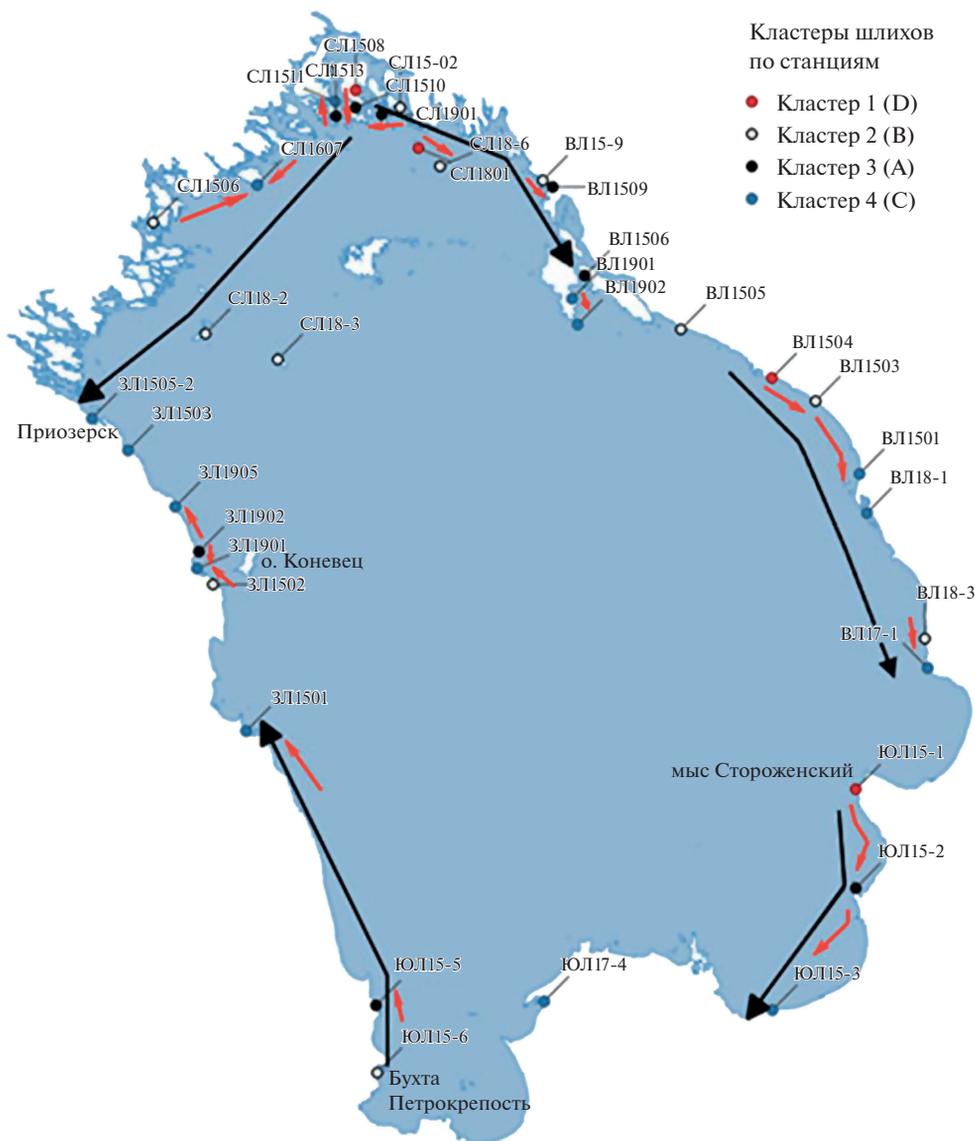


Рис. 4. Тенденции переноса тяжелой фракции вдоль берегов Ладожского озера. Красные стрелки – на основании результатов минералогического и гранулометрического анализа шлихов, черные стрелки – на основании результатов кластерного анализа.

Fig. 4. Trends in heavy fraction transport along the shores of Lake Ladoga. Red arrows – those based on the results of mineralogical and grain size analysis of concentrates, black arrows – based on the results of cluster analysis.

на самом мысу к кластеру А на станции ЮЛ 15-2 и далее к кластеру С на станциях ЮЛ 15-3 и ЮЛ 17-4. Все сказанное указывает на тенденцию к переносу тяжелой фракции вдоль берега на ЮЗ вплоть до восточного берега бухты Петрокрепость.

2. Далее, на западном берегу бухты Петрокрепость, имеются 2 станции, показывающие тенденцию к увеличению дальности переноса тяжелой фракции с юга на север — ЮЛ 15-6, кластер В и ЮЛ 15-5, кластер А. Следующая ЗЛ 1501 продолжает эту тенденцию своей принадлежностью к кластеру С. Далее вплоть до Приозерска (станция ЗЛ 1505-2) имеем группу станций с максимальным переносом, но у о. Конец две близко расположенные станции ЗЛ 1901 и ЗЛ 1902 дают нам ту же последовательность увеличения дальности переноса с юга на север от локального источника сноса. Суммируя изложенное, авторы сочли себя вправе признать существование тенденции к увеличению дальности переноса тяжелой фракции на север вдоль всего западного берега Ладожского озера с наложением прямого переноса от главного северного источника обломочного материала через глубоководную часть к северному участку западного берега.

3. Северное побережье Ладоги очень сильно изрезано, что характерно для фиардово-шхерных берегов. Состав шлихов говорит о разных направлениях берегового переноса. Отмечается преобладание кластеров ближнего переноса — D и особенно В. Присутствующие в подчиненном количестве кластеры А и С могут указывать на устойчивую хаотичность придонных течений в условиях сильной изрезанности берегов.

4. На восточном берегу Ладожского озера имеется несколько групп близко расположенных станций (ВЛ 15-9—ВЛ 1509; ВЛ 1504—ВЛ 1503—ВЛ 1501; ВЛ 18-3—ВЛ 17-1), распределение тяжелой фракции в которых дает основание предполагать тенденцию к переносу донных отложений с СЗ на ЮВ вдоль всего восточного берега.

5. Данные кластерного анализа дают основания предполагать наличие устойчивого переноса обломочного материала вдоль всего северного побережья на восток и на запад (рис. 4). Эти данные указывают также на последовательную смену кластеров (от наименьшей степени переработки материала к наибольшей) вдоль восточного берега с севера на юг и юго-восточного с востока на юго-запад. Также последовательная смена кластеров происходит на западном берегу — с юга на север.

Таким образом, на всех 4-х участках побережья Ладожского озера обнаружены вероятные тенденции к устойчивому переносу тяжелой фракции донных отложений в определенном направлении: на южном берегу — на запад, на западном — на север, на северном — на восток и на восточном — на юго-восток.

Вместе расположение этих цепочек показывает общую тенденцию к вдольбереговому устойчивому переносу донных отложений по часовой стрелке.

Направления течений в Ладожском озере изучаются много десятилетий, в частности, специалистами института Озероведения РАН. В результате этих исследований вырисовывается весьма сложная картина динамики перемещения водных масс в озере [9, 10]. Направления и скорости течений зависят от направления ветров, течений впадающих в озеро рек, плотности воды, рельефа дна и других факторов. В соответствии с этим выделяются несколько разновидностей течений в Ладожском озере: ветровые, инерциальные, циклонические. В основном направления и скорости течений меняются в зависимости от сезона [10].

Обнаруженная авторами тенденция к вдольбереговому устойчивому переносу донных отложений Ладоги по часовой стрелке разумеется есть лишь одно из многочисленных литодинамических следствий весьма сложного комплекса гидродинамических процессов, происходящих в Ладожском озере.

В мировой практике шлиховой метод применялся и применяется для поисков россыпных месторождений [17]. Однако для литодинамических исследований он применялся крайне мало. А вот статистические методы довольно широко используются в исследованиях пространственного распределения тех или иных геологических параметров. В частности, кластерный анализ используется для поиска месторождений полезных ископаемых, геохимических аномалий [14–16], для оценки воздействия на состояние окружающей среды. Так что использование кластерного и факторного анализа для выделения групп донных отложений по составу тяжелой фракции не представляет из себя что-то необычное.

При интерпретации результатов анализа распространения тяжелой фракции необходимо помнить, что условия отбора шлиховых проб отличаются друг от друга по геоморфологическим, лито- и гидродинамическим характеристикам. Это вносит некото-

рый элемент неопределенности во все сделанные выводы. Эту неопределенность можно существенно снизить в дальнейшем увеличением количества проб, отбираемых как можно более равномерно по всем берегам озера.

Насколько известно авторам, шлиховой метод, широко используемый для поисков россыпных месторождений, мало применяется для литодинамических построений в замкнутых водоемах. Полученный и представленный в настоящей статье значимый результат может инициировать дальнейшее применение этого метода для широкого спектра исследований литодинамических процессов. Использование статистического анализа для более качественной интерпретации результатов изучения тяжелой фракции также представляется перспективным направлением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распространение тяжелой фракции рыхлых прибрежных отложений Ладожского озера по ряду признаков (минеральный состав, крупность и окатанность) показывает долговременные тенденции перемещения береговых отложений.

Выделенные методами кластерного анализа 4 класса шлихов показывают различные степени дальности переноса частиц прибрежных отложений (по их степени переработки), что подтверждается результатами факторного анализа.

Обнаруженные частные тенденции направленности долговременного вдольберегового переноса на локальных участках берега в сумме показывают общую тенденцию к перемещению отложений вдоль берегов Ладоги по часовой стрелке.

Эта же тенденция была обнаружена ранее авторами на основе изучения шлихов на 18-ти прибрежных станциях Ладожского озера, и так же была подтверждена результатами кластерного и факторного анализа.

Для более уверенного утверждения о существовании долговременного переноса осадков вдоль берегов Ладожского озера необходимо продолжать наращивать количество шлиховых опробований с более равномерным их распределением по линии берега.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Гостемы ИНОЗ РАН № 0154-2019-0001 “Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов” № госрегистрации АААА-А19-119031890106-5, а также Гостемы СПбНЦ РАН 82.1 ФНИ “Разработка теории трансформации научно-инновационного пространства Санкт-Петербурга в контексте развития российской экономики с учетом теоретико-методологических основ устойчивого технологического развития региона на основе инновационно-инвестиционной деятельности и воспроизводства и формирования научно-образовательного потенциала Санкт-Петербурга”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Амантов А.В., Амантова М.Г.* Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории // Региональная геология и металлогения. № 59. 2014. С. 5–14.
2. *Анохин В.М., Науменко М.А., Субетто Д.А., Нестеров Н.А., Рыбакин В.Н.* Особенности геоморфологического строения дна Ладожского озера // География: развитие науки и образования. Коллективная монография по материалам Международной научно-практической конференции LXXI Герценовские чтения. Т. 1. Санкт-Петербург, 2018. С. 442–448.
3. *Анохин В.М., Томилин В.И., Батанов Ф.И., Дудакова Д.С., Уличев В.И.* Особенности распространения тяжелой фракции в береговых отложениях Ладожского озера // География: развитие науки и образования. Коллективная монография по материалам Международной научно-практической конференции LXXI Герценовские чтения. Т. 1. Санкт-Петербург, 2018. С. 448–453.
4. *Анохин В.М., Дудакова Д.С., Дудаков М.О.* Геоморфология и типизация берегов Ладожского озера по данным съемки беспилотного летательного аппарата // Геоморфология. 2019. № 1. С. 25–38.

5. Анохин В.М., Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Рыбакин В.Н. Результаты геолого-геоморфологических исследований дна и берегов Ладожского озера в 2015–2019 гг. // *Материалы Международной конференции (Школы) морской геологии*. М.: ИОРАН, 2019.
6. Анохин В.М., Дудакова Д.С. Распространение песков тяжелой фракции в прибрежных отложениях Ладожского озера // *Озера Евразии: проблемы и пути их решения* Материалы 2-й международной конференции 19–24 мая 2019. Часть 1. Казань, 2019. С. 224–229.
7. Бакулина Л.П. Шлиховое опробование и анализ шлиховых проб: учеб. Пособие / Л.П. Бакулина. 2-е изд., перераб. Ухта : УГТУ, 2014. 126 с.
8. Геоэкология Ладожского озера / Ред. В.Л. Иванов, В.И. Гуревич. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1995. 209 с.
9. Ладога / Ред. В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.
10. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / В.А. Румянцев, А.И. Соколин, Н.А. Нестеров. СПб.: Нестор-История, 2015. 199 с.
11. Пятов И.М., Анохин В.М. Использование методов кластерного анализа для изучения закономерностей распространения тяжелой фракции в отложениях береговой зоны Ладожского озера. География: развитие науки и образования. Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции LXXIV Герценовские чтения. Т. 1. Санкт-Петербург, 2021. С. 148–153.
12. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С.А. Кондратьев, Ш.Р. Поздняков, В.А. Румянцев. М., 2021. 637 с.
13. Anokhin V., Dudakova D., Dudakov M., Rybakin V., Naumenko M., Ulitchev V. The results of geological and geomorphological studies of the bottom and shores of Lake Ladoga 2015-18 years // *Geophysical Research Abstracts* Vol. 21, EGU 2019-2198-1, 2019 EGU General Assembly 2019 © Author(s) 2018. CC Attribution 4.0 license.
14. Hystad G., Downs, R.T., Edward E.S., Hazen R.M. Statistical analysis of mineral diversity and distribution: Earth's mineralogy is unique. *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 426. P. 154–157.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.028>
15. Joaquín A. Cortés, Palma José Luis, Wilson Marjorie. Deciphering magma mixing: The application of cluster analysis to the mineral chemistry of crystal populations // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2007. V. 165. Iss. 3–4. 163–188.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.05.018>
16. Rocha F., Vidinha J.M., Sa Caetano P., Gomes C. Statistical analysis of mineralogical parameters used as lithostratigraphic markers. . 2000. V. 44. P. 141–144.
17. Placer Gold Mining Methods URL: <https://www.911metallurgist.com/blog/placer-gold-mining-methods> (дата обращения 08.09.2022).

Longshore Sediment Transport in Lake Ladoga Based on Analyses of the Heavy Mineral Fraction of Sand in Coastal Sediments

V. M. Anokhin¹, *, O. M. Vinogradova¹, **, I. M. Pyatov², ***, and D. S. Dudakova¹, ****

¹*Institute of Lake Science of the Russian Academy of Sciences is a separate structural subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science “St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences”, St. Petersburg, Russia*

²*Herzen Russian State Pedagogical University, St. Petersburg, Russia*

*E-mail: vladanokhin@yandex.ru

**E-mail: vinrozy@yandex.ru

***E-mail: vvvvv1a@mail.ru

****E-mail: judina-d@yandex.ru

Abstract—In order to identify the directions of transport of coastal sediments of Lake Ladoga, heavy mineral fraction was extracted from sand samples collected on all types of its shores. The mineral composition, size and roundness of particles – features characterising the degree of reworking of coastal sediments – were assessed under a microscopic analysis. We identified 4 clusters with similar degrees of reworking of the source material, which, based on the results of the factor analysis, were ranked by relative transport distance from insignificant to very significant. The maximum number of samples with small transport distances was found on the northern shores of the lake, which can be explained by the location

of bedrock shores – the main sources of clastic material in the lake. Samples with maximum transport distances are relatively evenly distributed along all shores of the lake. The analysis of the results showed that on all shore reaches there is a transport of heavy fraction of bottom sediments in a certain direction: on the southern shore – to the west, on the western shore – to the north, on the northern shore – to the east and on the eastern shore – to the south-east. This allows us to conclude that there is a long-term trend of coastal sediment transport along the shores of Lake Ladoga in a clockwise direction.

Keywords: coastal zone, Lake Ladoga, coastal sediments, heavy fraction, cluster analysis, factor analysis, transport direction

REFERENCES

1. Amantov A.V., Amantova M.G. Razvitiye kotloviny Ladozhskogo ozera s pozicij lednikovoj teorii // Regional'naja geologija i metallogenija. № 59. 2014. S. 5–14.
2. Anohin V.M., Naumenko M.A., Subetto D.A., Nesterov N.A., Rybakin V.N. Osobennosti geomorfologicheskogo stroenija dna Ladozhskogo ozera // Geografija: razvitiye nauki i obrazovanija. Kollektivnaja monografija po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii LXXI Gercenovskie chtenija. T. 1. Sankt-Peterburg, 2018. S. 442–448.
3. Anohin V.M., Tomilin V.I., Batanov F.I., Dudakova D.S., Ulichev V.I. Osobennosti rasprostraneniya tjazheloj frakcii v beregovyh otlozhenijah Ladozhskogo ozera // Geografija: razvitiye nauki i obrazovanija. Kollektivnaja monografija po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii LXXI Gercenovskie chtenija. T. 1. Sankt-Peterburg, 2018. S. 448–453.
4. Anohin V.M., Dudakova D.S., Dudakov M.O. Geomorfologija i tipizacija beregov Ladozhskogo ozera po dannym s#emki bespilnogo letatel'nogo apparata // Geomorfologija. 2019. № 1. S. 25–38.
5. Anohin V.M., Dudakova D.S., Dudakov M.O., Rybakin V.N. Rezul'taty geologo-geomorfologicheskikh issledovanij dna i beregov Ladozhskogo ozera v 2015–2019 gg. // Materialy Mezhdunarodnoj konferencii (Shkoly) morskoy geologii. M., IORAN, 2019.
6. Anohin V.M., Dudakova D.S. Rasprostranenie peskov tjazheloj frakcii v pribrezhnyh otlozhenijah Ladozhskogo ozera // Ozera Evrazii: problemy i puti ih reshenija Materialy 2-j mezhdunarodnoj konferencii 19–24 maja 2019. Chast' 1. Kazan', 2019. S. 224–229.
7. Bakulina L.P. Shlihovoe oprobovanie i analiz shlihovyh prob: ucheb. Posobie / L.P. Bakulina. 2-e izd., pererab. Uhta: UGTU, 2014. 126 s.
8. Geojekologija Ladozhskogo ozera / Red. V.L. Ivanov, V.I. Gurevich. SPb.: VNIIOkeangeologija, 1995. 209 s.
9. Ladoga / Red. V.A. Rumjancev, S.A. Kondrat'ev. SPb.: Nestor-Istorija, 2013. 468 s.
10. Ladozhskoe ozero i dostoprimechatel'nosti ego poberezh'ja. Atlas / V.A. Rumjancev, A.I. Sorokin, N.A. Nesterov. SPb.: Nestor-Istorija, 2015. 199 s.
11. Pjatov I.M., Anohin V.M. Ispol'zovanie metodov klasternogo analiza dlja izuchenija zakonomenostej rasprostraneniya tjazheloj frakcii v otlozhenij beregovoj zony Ladozhskogo ozera. Geografija: razvitiye nauki i obrazovanija. Sbornik statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii LXXIV Gercenovskie chtenija. T. 1. Sankt-Peterburg, 2021. S. 148–153.
12. Sovremennoe sostojanie i problemy antropogennoj transformacii jekosistemy Ladozhskogo ozera v uslovijah izmenijushhegosja klimata / Red. S.A. Kondrat'ev, Sh.R. Pozdnjakov, V.A. Rumjancev. M.: 2021. 637 s.
13. Anokhin V., Dudakova Dina., Dudakov M., Rybakin V., Naumenko M., Ulitchev V. The results of geological and geomorphological studies of the bottom and shores of Lake Ladoga 2015–2018 years // Geophysical Research Abstracts Vol. 21. EGU 2019-2198-1. 2019 EGU General Assembly 2019 © Author(s) 2018. CC Attribution 4.0 license.
14. Hystad G., Downs, R.T., Edward E.S., Hazen R.M. Statistical analysis of mineral diversity and distribution: Earth's mineralogy is unique. Earth and Planetary Science Letters. 2015. V. 426. P. 154–157.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.028>
15. Joaquín A. Cortés, José Luis Palma, Marjorie Wilson. Deciphering magma mixing: The application of cluster analysis to the mineral chemistry of crystal populations // Journal of Volcanology and

Geothermal Research, 2007 Vol. 165, Iss. 3–4. 163–188.

<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.05.018>

16. Rocha F., Vidinha J.M., Sa Caetano P., Gomes C. Statistical analysis of mineralogical parameters used as lithostratigraphic markers. . 2000. V. 44. P. 141–144.
17. Placer Gold Mining Methods URL: <https://www.911metallurgist.com/blog/placer-gold-mining-methods> (data obrashhenija 08.09.2022).