

УДК 551.799

## МНОГОЛЕТНИЕ ДАННЫЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДОННЫХ ОСАДКОВ КАК ИНДИКАТОР УСТОЙЧИВОСТИ ОБСТАНОВКИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

Чечко В.А., Топчая В.Ю.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: che-chko@mail.ru*

Представлены результаты и интерпретация гранулометрических параметров донных осадков, отобранных в Калининградском заливе. Образцы были отобраны с поверхностного слоя (0–7 см) донных осадков в 1993 и 2020 гг. в одних и тех же точках. Осадки, отобранные в 1993 г., состояли в среднем из алевритовых (38%) и очень мелких песчаных частиц (27%). Основными примесями служили мелкие пески (12%) и илистые фракции (12%). По своим гранулометрическим характеристикам современные донные осадки отличались от осадков, изученных 17 лет назад. В их составе в среднем также преобладали алевриты и очень мелкие пески, однако алевритов было меньше (31% вместо 38%), а песков – больше (30% вместо 27%). Обобщенные данные гранулометрического анализа показывают, что существующие в заливе в последние 17 лет условия осадконакопления способствуют вымыванию из донных отложений тонкого осадочного материала и, соответственно, увеличению в их составе более крупных, песчаных фракций. Так, содержание суммарной песчаной фракции в среднем (для 20 проб) за 17 лет увеличилось с 50% до 62%. Показано, что изменения в составе осадков, произошедшие за последние 17 лет, неодинаковы и зависят от типов осадков. Максимальное увеличение песчаного материала отмечено в донных отложениях, в составе которых доминируют пески. В осадках с преобладанием илистых или алевритовых частиц содержание суммарной песчаной фракции увеличилось незначительно. Результаты исследований подтвердили выдвинутую ранее гипотезу о частичном выносе тонкого материала за пределы залива, или же о его перемещении и аккумуляции в более глубоких местах. Выявленное направление литодинамики залива обусловлено процессами ветро-волнового взмучивания, которые активизировались после искусственного ограничения речного стока в начале XX в.

**Ключевые слова:** Калининградский залив, донные отложения, гранулометрический состав, ветро-волновое взмучивание

## LONG-TERM DATA OF GRAIN SIZE PARAMETERS OF BOTTOM SEDIMENTS AS AN INDICATOR OF STABILITY OF SEDIMENTATION ENVIRONMENT

Chechko V.A., Topchaya V.Yu.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: che-chko@mail.ru*

The results and interpretation of the grain size parameters of bottom sediments sampled in the Kaliningrad Bay are presented. Samples were taken from the surface of bottom sediments in 1993 and 2020 at the same points. The sediments sampled in 1993 consisted of silty (38%) and very fine sandy particles (27%). The main impurities were fine sands (12%) and silty fractions (12%). In terms of their characteristics, modern bottom sediments differed from the sediments studied 17 years ago. Their composition was also dominated by silts and very fine sands, but there were fewer silts (31% instead of 38%), and more sands (30% instead of 27%). The generalized data of grain size analysis show that the sedimentation conditions existing in the bay over the past 17 years favor the washing out of fine sedimentary material from the bottom sediments and, accordingly, an increase in their composition of larger, sandy fractions. Thus, the content of the total sand fraction on average (for 20 samples) for 17 years increased from 50% to 62%. It is shown that changes in the composition of sediments that have occurred over the past 17 years are not the same and depend on the types of bottom sediments. The maximum increase in sandy material was noted in bottom sediments, which are dominated by sands. In sediments with a predominance of silty or silty particles, the content of the total sand fraction increased slightly. The results of the research confirmed the hypothesis put forward earlier about the partial removal of thin material outside the bay, or about its movement and accumulation in deeper places. The revealed direction of the lithodynamics of the bay is due to the processes of wind-wave roiling, which intensified after the artificial limitation of the river runoff at the beginning of the 20th century.

**Keywords:** Kaliningrad Bay, bottom sediments, grain size composition, wind-wave roiling

Седиментационные системы прибрежных мелководных водоемов лагунного типа (таких, как Вислинский залив Балтийского моря) находятся под влиянием как наземных, так и морских детерминант. Снабжение осадочным материалом регулируется речным стоком и береговой абразией [1], динамика верхнего слоя осадков – ветро-волновым воздействием [2], а роль приливов и отливов выполняют сгонно-нагонные явления [3]. В последние годы

все возрастающее влияние на функционирование прибрежных заливов оказывает антропогенный фактор: интенсификация судоходства, проведение дноуглубительных работ, рыболовство, добыча нерудных полезных ископаемых, рекреационная деятельность [4].

Важнейшая компонента седиментационных систем – донные отложения. Особый интерес исследователи проявляют к текстурным параметрам донных осадков и их

гранулометрическому спектру. Данные о содержании той или иной фракции дают представление о генезисе, физико-механических и химических свойствах, инженерно-геологических и геохимических особенностях и минеральном составе отложений [5]. Кроме этого, гранулометрический спектр верхнего слоя осадков является индикатором современных условий седиментации, а по его изменениям можно судить о динамике верхнего слоя и о направлении эволюции литосистемы в целом.

Закономерности распределения и гранулометрические типы донных осадков Калининградского залива (русская половина Вислинского залива) описаны в [6]. На основании сравнительного анализа картосхем донных осадков залива была выявлена динамика их поверхностного слоя за 33 года (1960–1993 гг.) [7]. В результате автор выдвинул гипотезу, согласно которой конечным результатом современных процессов седиментации является частичный вынос тонкого осадочного материала в море, сопровождающийся погрубением верхнего слоя донных отложений. Подтверждением данной гипотезы является работа [8], характеризующая динамику донных осадков за последние десятилетия в польской половине залива.

Цель работы – анализ и интерпретация гранулометрических параметров проб донных осадков, отобранных в Калининградском заливе в одних тех же точках в 1993 и 2020 гг. для оценки многолетних изменений в составе донных осадков и выявления направления эволюции осадконакопления в Калининградском заливе.

*Район и методы исследования*

Вислинский залив (частью которого является Калининградский залив) – второй по величине водоем лагунного типа Балтийского моря с максимальной глубиной 5,2 и средней – 2,7 м. Он расположен в юго-восточной части Балтийского моря и отделяется от него песчаной косой (рис. 1). Водобмен с морем осуществляется через судоходный Балтийский пролив и носит эстуарный характер, а роль приливо-отливных процессов в бесприливном водоеме выполняют сгонно-нагонные явления.

С момента своего возникновения в ранний атлантический период до начала XX в. залив подвергался только естественным процессам, определяющим среди которых был сток реки Висла. Значительная часть приносимого рекой осадочного материала осаждалась непосредственно в приустьевом районе, за счет чего устье реки выдвигалось в залив, что делало его мельче и меньше. В начале XX в. осуществлено зарегулирование речного стока, в результате которого 90% стока стало поступать непосредственно в море. После этого определяющее влияние стока реки Висла на гидрологические циклы, динамику взвеси, наносов и другие процессы седиментации уменьшилось. Вместе с тем значительно усилилось влияние Балтийского моря, в формировании верхнего слоя осадков на первое место выходят процессы ветро-волнового взмучивания донных отложений [9]. Осадочный материал, поступающий в лагуну, фиксируется на дне не сразу, ветровое волнение способствует его многократному взмучиванию.

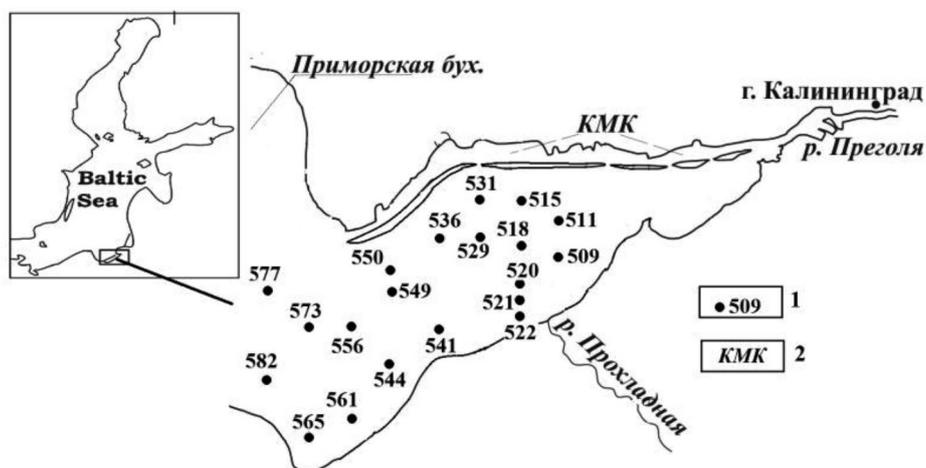


Рис. 1. Карта-схема расположения станций в акватории Калининградского залива: 1 – станция и ее номер; 2 – Калининградский морской канал

Вследствие этого верхний слой донных осадков отличается динамичностью и способностью к переотложению, то есть к перераспределению седиментационных компонентов внутри бассейна в соответствии с его гидродинамическим состоянием.

Пробы донных отложений были отобраны во время литологической съёмки Калининградского залива на 20 станциях в 1993 г., а затем на тех же станциях в 2020 г. (рис. 1). Они отбирались с помощью пробоотборника Петерсена из верхнего (0–7 см) слоя осадков. Первичная обработка полученных образцов донных осадков осуществлялась по методике, используемой сотрудниками Института океанологии РАН в морских геологических экспедициях. Гранулометрический анализ донных отложений определялся по массовому содержанию частиц различной крупности в процентах от массы исследуемого образца. Он выполнялся ситовым (фракции > 0,04 мм) и водно-механическим (фракции < 0,04 мм) методами [10].

Исходя из результатов гранулометрического анализа и в соответствии с классификацией Вентворта [11], была выполнена

типизация донных отложений. Графическим способом (по методу П. Траска) были рассчитаны медианный диаметр частиц (Md), коэффициент сортировки (So), коэффициент асимметрии (Sk) и эксцесс (Se). Хорошо сортированными считались осадки, коэффициент сортировки которых не превышал 2 ( $So < 2$ ), к средне сортированным относились осадки с коэффициентом от 2 до 3, а в плохо сортированных осадках коэффициент сортировки превышал 3 ( $So > 3$ ).

#### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты гранулометрического анализа проб донных осадков, отобранных в Калининградском заливе в 1993 и 2020 г., представлены в таблице. Осадки, отобранные в 1993 г., состояли в среднем из алевритовых (38%) и очень мелких песчаных частиц (27%). Основными примесями служили мелкие пески (12%) и илистые фракции (12%). По своим гранулометрическим характеристикам современные донные осадки отличались от осадков, изученных 17 лет назад (таблица).

Гранулометрический состав проб донных осадков, отобранных в одних и тех же точках в 1993 и 2020 гг.

Станция, №	Год отбора проб	Глуб., м	Содержание фракций (мм), %							Md	S <sub>0</sub>
			>1.0	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.125	0.125-0.063	0.063-0.04	<0.04		
509	2020	3.0	0.0	0.0	0.5	3.5	44.0	45.0	7.0	0.061	1.4
	1993		0.0	0.3	0.8	2.0	32.9	57.2	6.9	0.056	1.3
511	2020	3.1	0.0	0.0	0.0	4.5	22.0	59.0	14.5	0.052	1.2
	1993		0.0	0.0	0.0	2.2	19.0	62.3	16.8	0.05	1.2
515	2020	3.0	0.0	0.5	12.5	6.0	29.0	39.0	13.0	0.055	1.5
	1993		0.0	0.0	10.0	4.5	25.4	47.7	12.4	0.057	1.4
518	2020	3.2	0.0	0.0	0.0	5.4	17.0	64.0	13.0	0.052	1.2
	1993		0.0	0.0	0.0	4.0	15.0	66.0	15.0	0.049	1.2
520	2020	3.1	0.0	0.5	14.5	7.0	29.0	36.0	13.0	0.064	1.6
	1993		0.0	0.0	9.5	4.4	16.0	49.5	20.6	0.053	1.2
521	2020	2.4	39.0	32.0	2.2	8.0	17.3	1.0	0.0	0.81	3.0
	1993		28.5	24.5	1.0	5.4	30.0	10.3	0.0	0.521	3.9
522	2020	1.5	0.1	4.8	32.3	38.2	23.7	0.1	0.0	0.221	1.7
	1993		0.0	1.5	22.4	25.7	45.4	5.0	0.0	0.123	1.7
531	2020	3.0	6.0	7.5	12.5	13.0	34.5	25.5	0.8	0.1	2.2
	1993		1.5	2.4	5.0	10.2	19.2	45.6	16.2	0.056	1.7
529	2020	3.2	0.0	0.0	0.0	7.5	22.0	57.5	13.0	0.052	1.3
	1993		0.0	0.0	0.0	5.5	20.0	60.5	14.3	0.051	1.2
536	2020	3.7	0.0	0.0	1.5	9.0	32.5	44.0	17.0	0.058	1.4
	1993		0.0	0.0	1.0	8.5	33.0	40.4	17.2	0.058	1.4
541	2020	1.5	0.3	3.5	37.2	58.0	0.3	0.0	0.0	0.19	1.6
	1993		0.0	1.5	22.4	54.6	14.5	4.2	2.5	0.174	1.4
550	2020	3.2	0.1	1.0	2.5	20.0	66.0	9.6	0.0	0.10	1.4
	1993		0.0	0.0	1.0	16.3	54.4	19.6	8.0	0.081	1.4
549	2020	4.4	0.0	0.0	1.0	9.0	29.5	42.5	18.0	0.058	1.5
	1993		0.0	0.0	1.0	7.5	27.2	48.4	17.5	0.051	1.3
544	2020	2.5	0.0	0.2	12.0	23.4	53.0	7.3	4.2	0.112	1.5
	1993		0.0	0.0	10.2	21.0	40.6	17.4	10.8	0.085	1.5

В их составе в среднем также преобладали алевриты и очень мелкие пески, однако алевритов было меньше (31% вместо 38%), а песков – больше (30% вместо 27%). Что касается основных примесей, то ими также были мелкие пески и илстые фракции. Однако количество мелких песков к 2020 г. увеличилось с 12 до 15%, а содержание илстых частиц за 17 лет – уменьшилось (с 12% в 1993 г. до 7% в 2020 г.).

Обобщение параметров гранулометрического состава, являющихся отражением условий осадконакопления, позволило выявить отличительные особенности, характерные для современного осадконакопления. К ним следует отнести, прежде всего, доминирование процессов вымывания из донных отложений залива тонких осадочных частиц и, соответственно, увеличение в составе осадков более грубого, песчаного материала. Так, содержание суммарной песчаной фракции в среднем (для 20 проб) за 17 лет увеличилось с 50 до 62%. На треугольной диаграмме (рис. 2) показано распределение проб донных отложений (отобранных в одних и тех же точках в 1993 и 2020 гг.) относительно соотношения в них песчаных, алевритовых и илстых частиц. Видно, что практически все пробы сместились в направлении левого нижнего угла треугольника, то есть в сторону песчаной фракции.

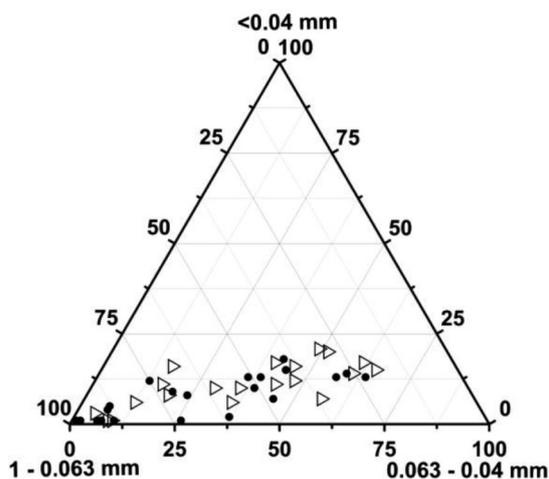


Рис. 2. Треугольная диаграмма соотношения песчаных, алевритовых и илстых частиц в пробах донных отложений, отобранных в 1993 г. (треугольники) и в 2020 г. (точки)

В то же время было выявлено, что изменения, произошедшие за последние 17 лет в составе осадков, неодинаковы, а величина

таких изменений зависит от типов осадков. Наибольшее увеличение числа осадочных частиц песчаных размерностей за этот период отмечено в осадках с преобладанием в их составе песчаного материала. Так, например, на станциях 522, 541, 544, расположенных на небольших глубинах (1,5–2,5 м), содержание суммарной песчаной фракции увеличилось на 6,8 и 18% соответственно. При этом содержание самого тонкого, илстого материала уменьшилось на 3% (ст. 541) и на 10% (ст. 544). На станциях 518, 536 и 549, где преобладают илстые и алевритовые отложения, содержание суммарной песчаной фракции увеличилось не более чем на 3%, а содержание илстых фракций практически не изменилось.

Пробы донных осадков 1993 и 2020 гг. имеют преимущественно одномодальный гранулометрический состав (рис. 3) с размерностью моды, которая, как правило, всегда больше 0,04 мм, и дефицитом частиц менее 0,04 мм. Это свидетельствует о постоянстве и непрерывности процесса осадконакопления, без резких колебаний, способных оказать серьезное влияние на изменение условий отложения и механической дифференциации донных осадков.

К числу важных гранулометрических параметров, характеризующих силу, скорость потока и гидродинамический уровень среды седиментации, относится медианный диаметр ( $Md$ ). Он представляет собой меру величины зерен, указывающую на минимальную энергию транспортирующей среды, необходимую для переноса осадка. Проведенные расчеты показывают, что для всех изученных проб донных осадков значения  $Md$  увеличились в среднем на 0,027 (с 0,093 в 1993 г. до 0,12 в 2020 г.). Больше всего средний размер осадочных частиц изменился в песчаных отложениях, за 17 лет значения  $Md$  в них увеличились на 0,07. Такие изменения функционально обусловлены увеличением значений критерия перемещения материала осадков, то есть формирование состава верхнего слоя современных осадков происходит в активной гидродинамической среде.

Что касается коэффициента сортировки, характеризующего степень однообразия зерен по величине, то его значения в осадках, отобранных в 1993 г., варьировали в диапазоне от 1,2 до 1,7. В пробах осадков 2020 г. значения коэффициента сортировки оказались идентичными, то есть осадки обладали одинаково хорошей степенью сортировки, практически не изменившейся за 17 лет.

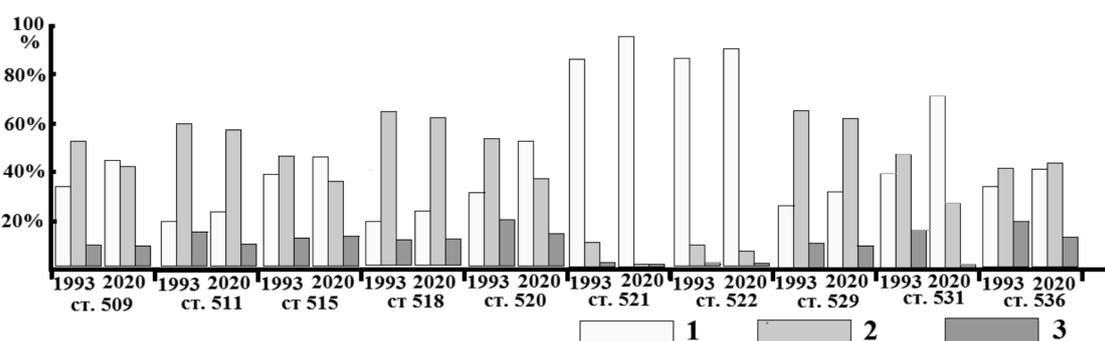


Рис. 3. Гистограмма песчаных, алевритовых и глинистых фракций донных отложений, собранных в 1993 и 2020 гг.: 1 – пески; 2 – алевриты; 3 – глинистые фракции

Это вполне соответствует современной обстановке седиментации, характеризующейся активной волновой переработкой и механической дифференциацией донных осадков.

Донные осадки с преобладанием песчаного материала имеют отрицательный коэффициент асимметрии, свидетельствующий о повышенном, по сравнению с нормальным распределением, содержании крупных фракций. Это косвенно означает, что скорость волновой переработки материала на глубинах до 2–2,5 м (где распространены пески) превышает интенсивность его поступления. Осадкообразование на этих глубинах происходит в условиях влияния сильных течений и одинакового воздействия прямого и обратного волновых потоков, обуславливающих вымывание тонкозернистого осадочного материала и хорошую сортировку осадков. В более глубоких местах условия осадкообразования отличаются слабыми постоянными течениями и ослабленным волновым воздействием на дно. Значения асимметрии и эксцесса донных осадков в углубленных местах залива указывают на доминирование процессов аккумуляции, то есть на преобладание поступления материала над скоростью его переработки.

### Выводы

Проведенные исследования выявили зависящие от типов осадков изменения их состава, произошедшие за 17 лет. Наибольшие увеличения среднего размера частиц свойственны осадкам с преобладанием песчаного материала. Сортировка осадков практически не изменилась и соответствует современным условиям седиментации. Значения асимметрии донных осадков (залега-

ющих на глубинах до 2–2,5 м) косвенно означают, что скорость волновой переработки материала в таких местах превышает интенсивность его поступления. Искусственное зарегулирование речного стока привело к изменению направления эволюции залива как системы в целом, так и к изменению его естественного режима седиментации в частности. Особенностью современной обстановки осадконакопления является вымывание из верхнего слоя донных осадков тонких частиц с последующим выносом их в море или же аккумуляцией в наиболее углубленных местах.

*Экспедиционные исследования и гранулометрический анализ проб донных осадков выполнялись при поддержке гранта РФФИ р\_а № 19-45-390013, анализ и интерпретация данных выполнялись в рамках госзадания ИО РАН (тема № 0128-2021-0012).*

### Список литературы / References

1. Kennish M.J. Coastal lagoon. Encyclopedia of Estuaries. Springer. 2015. P. 140–143.
2. Чечко В.А. Особенности современных процессов осадкообразования в Вислинском и Куршском заливах // Система Балтийского моря / Ред. А.П. Лисицын. М.: Научный мир, 2017. С. 373–380.
3. Chechko V.A. Features of modern sedimentation processes in Vistula and Curonian Lagoons // Sistema Baltijskogo morja / Red. A.P. Lisitsyn. M.: Nauchnyy mir, 2017. P. 373–380 (in Russian).
4. Rozynski G., Bielecka M., Margonski P., Psuty I., Szymanek L., Chubarenko B., Esiukova E., Domnin D., Domnina A., Pilipchuk V. The physio-geographical background and ecology of the Vistula Lagoon. Coastal Lagoons in Europe / ed. Ana I. Lillebø, Per Stålnacke, Eoffrey D. Gooch. London. IWA Publishing. 2016. P. 57–66.
5. Patin S.A. Anthropogenic Impact on Marine Ecosystems and Living Resources: Sources, Effects, Problems. RFRIO works «Control and protection of the state of the aquatic environment and biological resources». 2015. Vol. 154. P. 85–104.
6. Фёдоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Тамбиева Н.С., Андреев Ю.А., Михайленко О.А. Влияние гранулометрического состава донных отложений озера Байкал на распреде-

ление метана и сульфидной серы // Литология и полезные ископаемые. 2018. № 4. С. 1–13.

Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Tambieva N.S., Andreev Yu.A., Mikhaylenko O.A. Influence of granulometric composition of bottom sediments of lake Baikal on methane and sulfide sulfur distribution // *Litologiya i poleznyye iskopayemye*. 2018. № 4. P. 1–13 (in Russian).

6. Blazhishin A.I. The sediments of the Vistula Lagoon / Emelyanov E.M. (ed.). *Geology of the Gdansk Basin, Baltic Sea*. Kaliningrad: Yantarny Skaz. 2002. P. 349–352.

7. Chechko V. Spatial structure and evolution of bottom sediments in the Vistula Lagoon. *Transboundary waters and basins in the South-East Baltic* / ed. B.V. Chubarenko. Kaliningrad: Terra Baltica, 2008. P. 244–250.

8. Szymczak E. Characteristics of Sediments in a Changing Environmental Conditions in Vistula Lagoon (Poland). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. P. 1–10.

9. Gic-Grusza G., Dudkowska A. Wind waving. *Vistula Lagoon* / ed. J. Bolalek. PWN Warszawa. 2018. P. 86–89.

10. Буданова Т.Е., Озмидов О.Р., Озмидов И.О. Современные методы изучения гранулометрического состава грунтов // *Инженерные изыскания*. 2013. № 8. С. 66–73.

Budanova T.E., Ozmidov O.R., Ozmidov I.O. Modern methods for studying the particle size distribution of soils // *Inzhenernye izyskaniya*. 2013. No. 8. P. 66–73 (in Russian).

11. Wentworth C.K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*. 1922. V. 30. No. 5. P. 377–392.