

# Методический подход к изучению седиментационной устойчивости тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья по спутниковым данным загрязнения природных водоемов

С.П. Остапенко, С.П. Месяц✉

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

✉ s.mesyats@ksc.ru

**Резюме:** Приведены результаты изучения седиментационной устойчивости взвешенных тонкодисперсных минеральных частиц по данным спутниковых наблюдений их агрегации и седиментации на примере самоочищения субарктических озер от загрязнения отходами переработки апатит-нефелиновых, железных, медно-никелевых руд. По мультиспектральным снимкам водных объектов, сделанных космическим аппаратом Sentinel-2, определены средний размер взвешенных тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья и плотность распределения частиц по крупности.

Для учета агрегации разработана компьютерная модель динамики взвешенных частиц и выполнена параметризация сил электростатического и дисперсионного взаимодействия частиц минералов месторождений Кольского горнопромышленного комплекса. Показано, что баланс электростатической силы отталкивания и дисперсионных сил притяжения проявляется в образовании агрегатов тонкодисперсных минеральных частиц с характерной фрактальной размерностью, на примере нефелина, гематита, кварца, пирита. Разработан алгоритм согласования результатов компьютерного моделирования динамики взвешенных частиц с результатами, полученными обработкой спутниковых изображений водных объектов.

Определение седиментационной устойчивости загрязнения водоемов тонкодисперсными отходами переработки минерального сырья в рамках разработанного методического подхода не требует проведения наземных наблюдений; результаты исследований позволяют рассчитать скорость седиментации минеральных частиц и их агрегатов заданной крупности. Хорошее соответствие расчетных параметров агрегации и седиментации частиц и данных спутниковых наблюдений может быть использовано для мониторинга загрязнения водных объектов при адаптации технологий переработки минерального сырья к современным требованиям экологизации производства, а также при оценке водно-экологического потенциала территории для рационального управления природными ресурсами.

**Ключевые слова:** минеральное сырье, переработка, тонкодисперсные частицы, водные объекты, агрегация, седиментация, техногенное загрязнение, самоочищение, спутниковые данные, компьютерное моделирование

**Для цитирования:** Остапенко С.П., Месяц С.П. Методический подход к изучению седиментационной устойчивости тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья по спутниковым данным загрязнения природных водоемов. *Горная промышленность*. 2022;(6):104–110. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-104-110>

## Methodological approach to the study of the sedimentation stability of finely-dispersed mineral processing waste by satellite data on lakes pollution

S.P. Ostapenko, S.P. Mesyats✉

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉ s.mesyats@ksc.ru

**Abstract:** The paper presents the results of the study of sedimentation stability of suspended finely-dispersed mineral particles based on satellite observations of their aggregation and sedimentation. The authors studied satellite data on self-purification of subarctic lakes polluted by apatite-nepheline, iron, and copper-nickel ore processing wastes. The multispectral images of lakes taken by Sentinel-2 spacecraft have allowed determining the average size of suspended finely-dispersed mineral processing wastes and the density of particle size distribution.

To account for aggregation, the authors have designed a computer model of the dynamics of suspended particles and have set parameters of the forces of electrostatic and dispersion interactions of mineral particles from the Kola deposits. It is shown that the balance of repulsive electrostatic and dispersion attractive forces appears in the generation of aggregates of finely-dispersed mineral particles with characteristic fractal dimension, using Nepheline, Hematite, Quartz, and Pyrite as examples. The authors

have developed an algorithm for matching the computer simulation results of the dynamics of suspended particles with the results of satellite images processing of lakes.

The developed methodological approach makes it possible to determine the sedimentation stability of lakes' pollution by fine-dispersed mineral processing wastes without surface observations. The research results allow calculating the sedimentation velocity of mineral particles and their aggregates of a given size. The good correspondence between the calculated parameters of particles aggregation and sedimentation and satellite observations data can be used to monitor the pollution of water bodies when adapting mineral processing technologies to modern production ecologization requirements, as well as to assess the water-environmental potential of the territory for rational management of natural resources.

**Keywords:** mineral raw materials, processing, finely-dispersed particles, lakes, aggregation, sedimentation, man-induced pollution, self-purification, satellite data, computer modeling

**For citation:** Ostapenko S.P., Mesyats S.P. Methodological approach to the study of the sedimentation stability of finely-dispersed mineral processing waste by satellite data on lakes pollution. *Russian Mining Industry*. 2022;(6):104–110. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-104-110>

## Введение

Неизбежным следствием разработки месторождений полезных ископаемых является ухудшение состояния природной среды. Так, в 2020 г. при добыче полезных ископаемых более трети объема сточных вод, сброшенных в поверхностные природные водные объекты (1382,42 млн м<sup>3</sup>, или 4% от общего объема сброса), составляли загрязненные воды (502,16 млн м<sup>3</sup>), не прошедшие достаточную очистку; объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников составил 6,75 млн т (40% от общего объема выбросов)<sup>1</sup>. Проблема техногенной нагрузки на окружающую среду определяет актуальность разработки новых подходов к исследованию загрязнения предприятиями горной отрасли природных объектов, в том числе водных.

Характерным видом загрязнения вод, сопровождающим освоение георесурсов, является загрязнение взвешенными тонкодисперсными минеральными частицами, которое традиционно изучается по поглощению и рассеянию частицами света. Вместе с тем коэффициенты поглощения и обратного рассеяния света минеральными частицами могут быть рассчитаны на основе спектральной яркости водных объектов по мультиспектральным спутниковым снимкам [1; 2]. В этой связи анализ рассеяния света в поверхностном слое водных объектов по спутниковым данным является перспективным для мониторинга взвешенных веществ, поскольку в отличие от точечных наземных наблюдений, спутниковые снимки обеспечивают полный охват наблюдаемой территории. Исследование поверхностного слоя водных объектов как единого целого позволяет наблюдать развернутый в пространстве процесс самоочищения воды от загрязнения взвешенными веществами, в том числе в результате седиментации, что является принципиально важной предпосылкой оценки водно-экологического потенциала территории для рационального управления водными ресурсами [3].

Однако применение методов спутникового мониторинга загрязнения водных объектов суши ограничено их меньшей изученностью по сравнению с океаническими водами, поскольку снимки с космических аппаратов (КА) MODIS Aqua и Sentinel-3, предназначенных для мониторинга океана, с пространственным разрешением от 250 до 1000 м/пк малоприменимы для изучения состояния рек и

озер. В то же время мультиспектральные снимки высокого разрешения с КА Sentinel-2 и Landsat с пространственным разрешением от 10 до 60 м/пк не содержат достаточного количества спектральной информации, необходимой для всесторонней оценки качества вод по методикам, разработанным в ходе мониторинга океанов. Так, по сравнению с мультиспектральным снимком с КА MODIS Aqua, который составлен из 36 спектральных полос, или снимком сенсоров OLCI КА Sentinel-3 – 21 спектральная полоса, снимки с КА Sentinel-2 и Landsat содержат меньше информации об отраженном поверхностью свете, поскольку состоят соответственно из 13 и 11 спектральных полос.

Недостаточность спектральной информации для корректной обработки снимков высокого разрешения с КА Sentinel-2 и Landsat представляет трудноразрешимую проблему, поскольку решающую роль в интерпретации данных спутникового мониторинга водных объектов играет атмосферная коррекция снимков, что обусловлено слабым отражением солнечного света. Возможным решением этой проблемы является нейросетевая обработка спутниковых изображений, например, с помощью программного пакета C2RCC, обобщающего результаты более чем 5 млн подспутниковых наблюдений и данные модельных расчетов, что позволяет оценивать оптические параметры поверхностного слоя водных объектов суши по снимкам высокого разрешения [4]. Следует отметить, что ввиду расчетной сложности аналитического описания рассеяния света в анизотропно-неоднородных средах определение по спутниковым снимкам оптических параметров среды и размера частиц взвешенных веществ требует предварительного проведения натурных наблюдений и, следовательно, носит полуэмпирический характер.

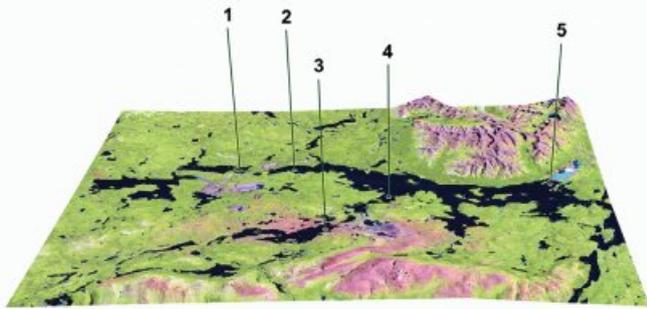
В этой связи перспективным направлением исследования агрегации частиц взвешенных веществ, дополненным к данным спутникового мониторинга водных объектов, представляется расчет движения частиц в водной среде с учетом сил дисперсионного и электростатического взаимодействия в соответствии с теорией Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека (ДЛФО), а также сопротивления прослойки воды между частицами при их сближении [5]. Поскольку аналитическое описание движения трех и более взаимодействующих частиц невозможно, моделирование динамической гетерофазной системы с использованием компьютерных технологий представляется оправданным для сокращения объема натурных исследований.

<sup>1</sup> О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова; 2021. 864 с. Режим доступа: <https://2020.ecology-gosdoklad.ru/>

В развитие предыдущих исследований [6] рассматривается возможность применения спутниковых данных для изучения самоочищения поверхностного слоя природных водных объектов от загрязнения тонкодисперсными отходами переработки минерального сырья в результате их седиментации и их согласования с результатами компьютерного моделирования агрегации частиц.

**Объект исследования**

Исследование седиментационной устойчивости при самоочищении природных водоемов от загрязнения тонкодисперсными отходами переработки минерального сырья по данным спутниковых наблюдений проводилось на примере субарктических озер Имандра, Колозеро, Мончеозеро, компактно расположенных в зоне влияния крупнейших предприятий, перерабатывающих сырье апатит-нефелиновых, железорудных, медно-никелевых месторождений Кольского горнопромышленного комплекса (Мурманская область). Гидрохимические показатели озер подобны и характеризуются нейтральной средой (рН 6,4–7,5), невысокой минерализацией (25–72 мг/л); глубина на большей части площади озер составляет 10–25 м [7–9]. Расположение объектов исследования показано на рис. 1.



**Рис. 1**  
 Расположение объектов исследования  
 1 – озеро Колозеро;  
 2 – озеро Имандра губа Куреньга;  
 3 – озеро Мончеозеро;  
 4 – озеро Имандра губа Монче;  
 5 – озеро Имандра губа Белая

**Fig. 1**  
 Location of the surveyed sites  
 1 – Lake Kolozero,  
 2 – Lake Imandra, the Kurenga Bay,  
 3 – Lake Moncheozero,  
 4 – Lake Imandra, the Monche Bay, 5 – Lake Imandra, the Belaya Bay

**Данные спутниковых наблюдений и их обработка**

При изучении седиментационной устойчивости техногенного загрязнения природных водоемов тонкодисперсными отходами переработки минерального сырья использовались данные съемки КА Sentinel-2 Европейского космического агентства (ESA), сделанные в июне 2020–2022 гг. Отбирались безоблачные снимки, выполненные при содержании влаги в столбе атмосферы не выше 3%, что позволило уменьшить влияние атмосферных условий на результаты обработки изображений водных объектов. Спутниковые снимки с исходным разрешением в горизонтальной плоскости 10–60 м/пк преобразовывались к разрешению 10 м/пк в каждом спектральном канале и далее обрабатывались нейросетевым алгоритмом.

Нейросетевой алгоритм C2RCC, использованный для обработки мультиспектральных спутниковых данных, входит в качестве программного модуля в состав про-

граммного комплекса Sentinel Application Platform (SNAP), разработанного ESA. С помощью C2RCC рассчитывались оптические параметры верхнего слоя водных объектов. Для оценки крупности взвешенных минеральных частиц, их агрегатов и плотности их распределения по крупности использовался скорректированный с учетом атмосферных условий коэффициент обратного рассеяния излучения  $b(\lambda)$  в спектральных каналах с длинами волн 559,8; 740,5; 864,7 нм и шириной каналов 36; 15; 21 нм соответственно. Использовались также являющиеся выходными данными нейросетевой обработки сведения о водной толще поверхностного слоя для расчета скорости седиментации частиц и их агрегатов; соотношение минерального и органического компонентов взвешенных веществ для контроля достоверности расчетов.

Каждый пиксель спутникового изображения водного объекта рассматривался в качестве мониторинговой точки. Количество обработанных пикселей составило: озеро Имандра –  $6,4 \times 10^5$ , Колозеро –  $2,7 \times 10^5$ , Мончеозеро –  $4,0 \times 10^5$ , в сумме –  $1,3 \times 10^6$ .

**Расчет средней крупности взвешенных минеральных частиц**

Для характеристики загрязнения водных объектов тонкодисперсными отходами переработки минерального сырья по данным спутниковых наблюдений рассчитывалось  $D_{50}$  – среднее значение (медиана) крупности частиц:

$$D_{50} = 79,8121 \frac{b(532)^{1,04105}}{0,04815 + b(532)^{1,04105}}, \tag{1}$$

где  $b(532)$  – спектральный коэффициент рассеяния света частицами на длине волны 532 нм [10]. Поскольку в мультиспектральном снимке Sentinel-2 отсутствует спектральный канал с длиной волны 532 нм, расчет  $D_{50}$  проводился с использованием спектрального коэффициента рассеяния света на длине волны 559,8 нм.

**Расчет скорости седиментации частиц техногенного загрязнения**

Расчет скорости седиментации частиц техногенного загрязнения и их агрегатов проводился по уравнению

$$v = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu} D^{3-n} \frac{D_{agg}^{n-1}}{1 + 0,15 Re_{agg}^{0,687}}, \tag{2}$$

где  $D, D_{agg}$  – диаметр частицы и агрегата частиц соответственно;  $\rho_s, \rho_w$  – плотность минеральной частицы и воды;  $\mu$  – вязкость воды;  $n$  – фрактальная размерность агрегата частиц;  $Re$  – число Рейнольдса [11; 12].

Значениям фрактальной размерности  $n$ , близким к 3, соответствуют плотные агрегаты частиц и сами минеральные частицы; значениям  $n$ , близким к 2, соответствуют рыхлые структуры; значениям  $n$ , меньшим 2, структуры, переходные от двумерных к одномерным вплоть до линейных структур при значении  $n$  равной 1 [13]. В случае  $n = 3$  (частица) и  $Re \ll 1$  – уравнение (2) переходит в формулу Стокса, описывающую движение сферического тела в поле тяготения в жидкости при наличии трения

$$v = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu} D^2, \tag{3}$$

обозначения те же, что и в уравнении (2).

**Моделирование динамики взвешенных минеральных частиц**

Для оценки величины фрактальной размерности агрегатов выполнялось компьютерное моделирование их образования при столкновении минеральных частиц, взвешенных в жидкости.

Взаимодействие частиц в водной среде определяется электростатической и дисперсионными силами и сопротивлением водного слоя при их сближении. Поскольку аналитическое описание движения большого числа частиц невозможно, моделирование агрегации выполнялось расчетом их парных взаимодействий с шагом времени меньшим интервала между столкновениями частиц, что потребовало значительного объема вычислений. Для расчета движения минеральных частиц использовался метод молекулярной динамики в программной реализации свободно распространяемого программного комплекса LAMMPS (Национальная лаборатория Сандия Минэнерго США), сочетающего возможности параллелизма вычислений с расчетом требуемых сил взаимодействия частиц, а также величины радиуса инерции агрегатов частиц, требующейся для расчета их фрактальной размерности, что упрощает построение моделей и дальнейшую обработку результатов моделирования. Программный комплекс предоставляет возможность нормирования параметров, что использовалось при учете полидисперсного характера распределения минеральных частиц и их агрегатов по крупности. Нормирование расстояния, массы, энергии выполнялось соответственно по граничной крупности частиц, массе минеральной частицы граничной крупности, постоянной Гамакера как базовым параметрам. В качестве алгоритма поддержания температуры модельной системы средствами программного комплекса имитировалось взаимодействие минеральных частиц с частицами жидкости, находящимися в броуновском движении (термостат Ланжевена). Фрактальная размерность агрегатов рассчитывалась по зависимости радиуса инерции модельных агрегатов от числа их составляющих частиц [14; 15]. Для параметризации модели агрегации минеральных частиц использовались экспериментальные данные о величине их константы Гамакера [6], а для учета электростатического взаимодействия определялся дзета-потенциал поверхности частиц нефелина, гематита, кварца, пирита с использованием анализатора «Photocor Compact Z» (Россия).

**Согласование данных спутниковых наблюдений и компьютерного моделирования агрегации минеральных частиц**

Согласование данных о фрактальной размерности агрегатов частиц, полученных в ходе компьютерного моделирования, с фактическими данными спутниковых наблюдений средней крупности частиц и агрегатов в каждой мониторинговой точке проводилось одновременным учетом скорости осаждения минеральных частиц, их агрегатов и скорости переноса загрязнения от источника – базовым гидрологическим факторам процесса самоочищения водных объектов, в соответствии со следующими условиями

$$\begin{cases} v_{i,k}^j = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu} (D_{50}^{i,j})^{3-n_i} \frac{(D_k^j)^{n_i-1}}{1+0.15Re^{0.687}}, \\ D_k^j = kD_{50}^{i,j}, \\ f_i(n_i, k, w_i) = \sum_j \sum_k \left( \left[ \frac{v_{i,k}^j l_j}{w_i} > \left( 1 - \frac{v_{i,k}^j l_j}{w_i h_i^j} \right) \right] \right) \rightarrow \max, \\ i=1..5, 2 \leq k \leq 8, 2 \leq n_i \leq 3 \end{cases} \quad (4)$$

где  $v_i^j$  – скорость осаждения минеральных частиц и агрегатов, рассчитанная для  $j$ -й мониторинговой точки (пиксела спутникового изображения)  $i$ -го водного объекта, находящегося на расстоянии  $l_j$  от источника загрязнения;  $w_i$  – скорость переноса загрязнения взвешенными веществами от источника на  $i$ -м водном объекте;  $D_{50}^{i,j}$  – средний размер частицы, рассчитанный по спутниковым данным для  $j$ -й мониторинговой точки  $i$ -го водного объекта;  $D_k^j$  – диаметр агрегата, отличающийся от среднего размера частиц в  $k$  раз;  $k$  – расчетный показатель агрегации частиц, установленный в ходе компьютерного моделирования;  $n_i$  – фрактальная размерность агрегата частиц загрязнения  $i$ -го водного объекта, полученная в результате согласования данных.

На первом этапе согласования для каждого пиксела спутникового изображения водного объекта проводилось сравнение водной толщи поверхностного слоя, полученной по спутниковым данным, и глубины осаждения минеральных частиц и агрегатов с учетом уравнения (4). Наличие седиментирующих частиц в поверхностном слое соответствовало 1, отсутствие – 0. Результат сравнения глубины осаждения частиц и водной толщи поверхностного слоя умножался на весовой коэффициент для учета их отношения и суммировался по всем пикселям, что составляло целевую функцию, максимизированную для каждого водного объекта. Максимизация целевой функции проводилась с использованием языка статистического моделирования R в области изменения значений фрактальной размерности и крупности агрегатов минеральных частиц, скорости переноса взвешенных тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья от источника таким образом, чтобы найденные решения не находились на границах области поиска.

На втором этапе расчетов из полученного множества анализировались и усреднялись решения, соответствующие минимальным значениям переменных параметров: скорости переноса загрязнения взвешенными частицами от источника и размера агрегатов частиц.

**Параметризация распределения крупности взвешенных частиц**

Для проверки адекватности результатов согласования параметров седиментационной устойчивости взвешенных тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья определялась плотность их распределения по крупности по спутниковым данным. С этой целью использовалась зависимость степенного вида, аналогичная формуле Годэна-Андреева для тонких классов продуктов измельчения руд:

$$N(D) = N_0 \left( \frac{D_0}{D} \right)^\theta, \quad (5)$$

где  $N(D)$  – плотность счѐтного распределения частиц по крупности;  $D_0$  – базовое значение крупности частиц;  $N_0$  – значение плотности распределения при базовой крупности частиц  $D_0$ ;  $\theta$  – безразмерный показатель степени, характеризующий соотношение численности тонкодисперсных и более крупных частиц.

Показатель степени  $\theta$  рассчитывался по эмпирическому уравнению (6) полученному в результате имитационного моделирования рассеяния света на взвешенных частицах разной крупности с учетом монотонного характера зависимости изменения спектрального коэффициента рассеяния с изменением длины волны света (7) [1;16]:

$$\theta = -0.00191\eta^3 + 0.127\eta^2 + 0.482\eta + 3.52 ; \quad (6)$$

$$b(\lambda) = b(\lambda_0) \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^\eta, \quad (7)$$

где  $b(\lambda)$  – спектральный коэффициент рассеяния света на частицах;  $b(\lambda_0)$  – спектральный коэффициент рассеяния света на частицах на базовой длине волны света  $\lambda_0$ ;  $\lambda$  – длина волны света. Для расчета  $\eta$  использовались спектральные коэффициенты рассеяния света, рассчитанные для спектральных каналов 740,5 и 864,7 нм, что практически совпадает с рекомендуемыми в работе [16] значениями длины волны 745 и 862 нм соответственно.

**Результаты и их обсуждение**

Результаты параметризации седиментации тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья, полученные обработкой данных спутниковых наблюдений, сведенные в табл. 1, позволяют рассчитать по уравнению (4) скорость осаждения частиц и агрегатов заданной крупности, как величину обратно пропорциональную их седиментационной устойчивости.

**Таблица 1**  
Показатели седиментации тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья исследованных водных объектов

№	Водный объект	Средняя крупность (медиана) частиц $D_{50}$ , мкм		Фрактальная размерность агрегатов $n_i$	Степенной показатель $\theta$ в уравнении плотности распределения частиц по крупности	
		вблизи источника загрязнения	вдали от источника загрязнения		вблизи источника загрязнения	вдали от источника загрязнения
1	Озеро Колозеро	2,85	1,72	2,9	5,13	3,24
2	Озеро Имандра губа Куреньга	0,85	0,53	2,3	3,68	3,37
3	Озеро Мончезеро	1,26	0,87	2,3	7,60	3,42
4	Озеро Имандра губа Монче	1,20	0,59	2,4	5,75	3,54
5	Озеро Имандра губа Белая	12,06	4,42	2,8	5,60	3,47

Для всех рассмотренных водных объектов наблюдается уменьшение среднего размера взвешенных минеральных частиц с удалением от источника загрязнения, что является следствием седиментации в первую очередь крупных частиц и крупных агрегатов. Эта закономерность подтверждается уменьшением степенного показателя плотности распределения тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья по крупности, что свидетельствует о более равномерном распределении частиц по крупности с удалением от источника загрязнения (см. табл. 1).

Расчетное значение фрактальной размерности согласуется с результатами компьютерного моделирования динамики образования и распада агрегатов частиц и соответствует балансу силы электростатического отталкивания и дисперсионных сил притяжения минеральных частиц (табл. 1 и 2). В наибольшей степени процесс образования рыхлых агрегатов с фрактальной размерностью около 2.25 характерен для частиц гематита с сильным дисперсионным взаимодействием (высокой константой Гамакера) и невысоким электростатическим потенциалом поверхно-

сти и пирита с низкими константой Гамакера и потенциалом поверхности (см. табл. 2). Фрактальная размерность агрегатов 2,3–2,4 характерна для загрязнения тонкодисперсными отходами переработки минерального сырья губы Куреньга, расположенной вблизи разрабатываемой группы железорудных месторождений, губы Монче и озера Мончезеро, расположенных в зоне воздействия горно-металлургического комбината, перерабатывающего сульфидные медно-никелевые руды (см. табл. 1).

Для минеральных частиц кварца и нефелина, обладающих высоким электростатическим потенциалом поверхности, нехарактерно образование агрегатов по данным компьютерного моделирования динамики частиц. Увеличение концентрации частиц в компьютерной модели не приводит к образованию агрегатов, состоящих более чем из двух частиц, что не позволяет рассчитать их фрактальную размерность, принятую в результате равной тройке, что соответствует фрактальной размерности одиночных минеральных частиц (см. табл. 2). Результаты компьютерного моделирования согласуются с данными об отсутствии агрегации частиц кварца и нефелина при наблюдении загрязнения озера Колозеро отходами переработки железистых кварцитов и губы Белой озера Имандра соответственно (табл. 1).

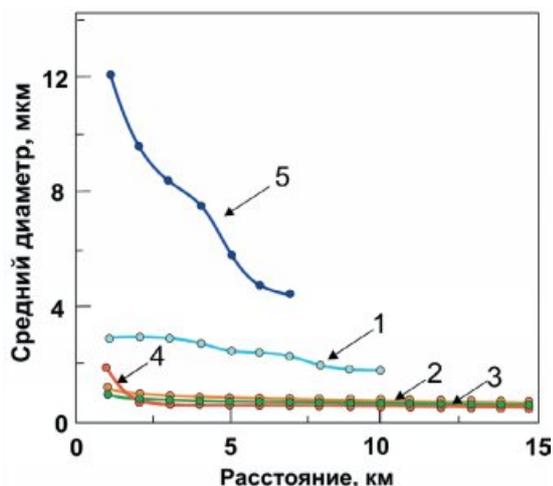
**Table 1**  
Sedimentation indicators of finely dispersed mineral processing wastes in the investigated water bodies

**Таблица 2**  
Параметры взаимодействия взвешенных минеральных частиц и расчетная фрактальная размерность их агрегатов

**Table 2**  
Interaction parameters of suspended mineral particles and calculated fractal dimension of their aggregates

Минерал	Константа Гамакера, зептоДж [6]	$\xi$ – потенциал, мВольт	Фрактальная размерность агрегатов
Нефелин	10,7	-38	3,0
Гематит	10,8	-10	2,3
Пирит	5,0	-5	2,2
Кварц	10,5	-32	3,0

Следует отметить различие размеров взвешенных частиц тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья на водных объектах, которые можно условно разделить на две группы.



**Рис. 2**  
Зависимость среднего диаметра взвешенных частиц тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья от расстояния до источника загрязнения:  
1 – озеро Колозеро;  
2 – озеро Имандра губа Куреньга;  
3 – озеро Мончеозеро;  
4 – озеро Имандра губа Монче;  
5 – озеро Имандра губа Белая

**Fig. 2**  
Dependence of average diameter of suspended finely dispersed mineral processing waste on the distance from the pollution source:  
1 – Lake Kolozero,  
2 – Lake Imandra, the Kurenga Bay,  
3 – Lake Monchezero,  
4 – Lake Imandra, the Monche Bay,  
5 – Lake Imandra, the Belaya Bay

Источником загрязнения водных объектов первой группы являются фильтраты складированных отходов переработки минерального сырья: железистых кварцитов и апатит-нефелиновых руд (соответственно кривые 1 и 5, рис. 2), для которых наблюдаются частицы крупностью более 1 мкм. Максимальный из наблюдаемых медианный размер частиц нефелина обусловлен выносом крупнодисперсных отходов переработки минерального сырья рекой Белой, впадающей в губу Белую озера Имандра, и смешением вод реки с фильтратом хвостохранилища.

Ко второй группе относятся озеро Мончеозеро, губа Монче и губа Куреньга озера Имандра (соответственно кривые 2, 3, 4, рис. 2) с малым, порядка 1 мкм, размером взвешен-

ных частиц и значительной дальностью распространения отходов переработки минерального сырья от источника загрязнения. С учетом последнего обстоятельства можно предположить наличие аэротехногенной составляющей в загрязнении водных объектов второй группы.

### Заключение

На базе нейросетевых методов обработки данных спутниковых наблюдений водных объектов и компьютерного моделирования динамики взвешенных частиц разработан методический подход к определению седиментационной устойчивости загрязнения водоемов тонкодисперсными отходами переработки минерального сырья без привлечения наземных исследований.

Для тестирования работоспособности разработанной методики изучена седиментационная устойчивость тонкодисперсных минеральных частиц на примере загрязнения вод субарктического озера Имандра и прилегающих озер отходами переработки апатит-нефелиновых, железных, медно-никелевых руд. В результате обработки данных спутниковых наблюдений установлен дисперсный состав поверхностного слоя водного объекта и с учетом электростатического потенциала частиц выполнена параметризация компьютерной модели суспензии, находящейся в поле силы тяготения. На примере нефелина, гематита, кварца, пирита показано, что в результате преобладания дисперсионных сил притяжения над электростатической силой отталкивания происходит агрегация тонкодисперсных минеральных частиц с характерной фрактальной размерностью агрегатов.

В результате согласования данных получено хорошее соответствие расчетных параметров седиментации тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья в поверхностном слое водных объектов и данных спутниковых наблюдений. Методический подход к оценке седиментационной устойчивости тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья не требует проведения натурных наблюдений, обеспечивает полный охват наблюдаемой территории и может быть использован для мониторинга загрязнения водных объектов при адаптации технологий переработки минерального сырья к современным требованиям экологизации производства.

### Список литературы

- Kostadinov T.S., Siegel D.A., Maritorena S. Retrieval of the particle size distribution from satellite ocean color observations. *Journal of Geophysical Research*. 2009;114(C4):C09015. <https://doi.org/10.1029/2009JC005303>
- Лабутина И.А., Тарасов М.К. Изучение распространения твердого стока реки Селенги по космическим снимкам. *География и природные ресурсы*. 2018;(1):66–72.
- Якуцени С.П. Вода: ресурсы, запасы, рынки. *Горная промышленность*. 2022;(4):120–128. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-120-128>
- Sherjah P.Y., Sajikumara N., Nowshaja P.T. Semi-analytical model for TSI estimation of inland water bodies from Sentinel 2 imagery. *Journal of Hydroinformatics*. 2022;24(2):444–463. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.151>
- Turetta L., Lattuada M. The role of hydrodynamic interactions on the aggregation kinetics of sedimenting colloidal particles. *Soft Matter*. 2022;(8):1715–1730. <https://doi.org/10.1039/D1SM01637G>
- Остапенко С.П., Месяц С.П. Методический подход к характеристике загрязнения природных водоемов по спутниковым данным с учетом агрегации тонкодисперсных отходов переработки минерального сырья. *Горная промышленность*. 2021;(6):110–116. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-110-116>
- Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Лукин А.А., Кудрявцева Л.П., Ильящук Б.П., Ильящук Л.И. и др. *Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра*. М.: Наука; 2002. 402 с.
- Кашулин Н.А. (ред.) *Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области: центральный и юго-западный районы Мурманской области (бассейн Баренцева моря, Белого моря и Ботнического залива Балтийского моря)*. Апатиты: КНЦ РАН; 2013. Ч. 1. 298 с.
- Кашулин Н.А. (ред.) *Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области: центральный и юго-западный районы Мурманской области (бассейн Баренцева моря, Белого моря и Ботнического залива Балтийского моря)*. Апатиты: КНЦ РАН; 2013. Ч. 2. 253 с.

10. Nasiha H.J., Shanmugam P., Sundaravadivelu R. Estimation of sediment settling velocity in estuarine and coastal waters using optical remote sensing data. *Advances in Space Research*. 2019;63(11):3473–3478. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.02.023>
11. Winterwerp J.C. A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Research*. 1998;36(3):309–326. <https://doi.org/10.1080/00221689809498621>
12. Lee B.J., Fettweis M., Toorman E., Molz F.J. Multimodality of a particle size distribution of cohesive suspended particulate matters in a coastal zone. *Journal of Geophysical Research*. 2012;117(C3):C03014. <https://doi.org/10.1029/2011JC007552>
13. Lazzari S., Nicoud L., Jaquet B., Lattuada M., Morbidelli M. Fractal-like structures in colloid science. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2016;235:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.05.002>
14. Jungblut S., Joswig J.-O., Eychmüller A. Diffusion- and reaction-limited cluster aggregation revisited. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019;21(10):5723–5729. <https://doi.org/10.1039/c9cp00549h>
15. Pashminehazar R., Kharaghani A., Tsotsas E. Determination of fractal dimension and prefactor of agglomerates with irregular structure. *Powder Technology*. 2019;343:765–774. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.046>
16. Shi W., Wang M. Characterization of suspended particle size distribution in global highly turbid waters from VIIRS measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019;124(6):3796–3817. <https://doi.org/10.1029/2018JC014793>

## References

1. Kostadinov T.S., Siegel D.A., Maritorea S. Retrieval of the particle size distribution from satellite ocean color observations. *Journal of Geophysical Research*. 2009;114(C4):C09015. <https://doi.org/10.1029/2009JC005303>
2. Labutina I.A., Tarasov M.K. Study of the selenga river sediment runoff distribution using satellite images. *Geografija i Prirodnye Resursy*. 2018;(1):66–72. (In Russ.)
3. Yakutseni S.P. Water: resources, reserves, markets. *Russian Mining Industry*. 2022;(4):120–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-120-128>
4. Sherjah P.Y., Sajikumara N., Nowshaja P.T. Semi-analytical model for TSI estimation of inland water bodies from Sentinel 2 imagery. *Journal of Hydroinformatics*. 2022;24(2):444–463. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.151>
5. Turetta L., Lattuada M. The role of hydrodynamic interactions on the aggregation kinetics of sedimenting colloidal particles. *Soft Matter*. 2022;(8):1715–1730. <https://doi.org/10.1039/D1SM01637G>
6. Ostapenko S.P., Mesyats S.P. Methodological approach to characterizing pollution of natural water bodies using satellite data with account of aggregation of finely dispersed mineral processing waste. *Russian Mining Industry*. 2021;(6):110–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-110-116>
7. Moiseenko T.I., Dauvalter V.A., Lukin A.A., Kudryavtseva L.P., Ilyashchuk B.P., Ilyashchuk L.I. et al. *The anthropogenic modifications of the ecosystem of the lake Imandra*. Moscow: Nauka; 2002. 402 p. (In Russ.)
8. Kashulin N.A. (ed.) *Annotated ecological catalogue of lakes in the Murmansk region: the central and southwest areas of the Murmansk region (basins of the Barents Sea, the White Sea and the Bothnia gulf of the Baltic Sea)*. Apatity: Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2013. Part. 1. 298 p. (In Russ.)
9. Kashulin N.A. (ed.) *Annotated ecological catalogue of lakes in the Murmansk region: the central and southwest areas of the Murmansk region (basins of the Barents Sea, the White Sea and the Bothnia gulf of the Baltic Sea)*. Apatity: Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2013. Part. 2. 253 p. (In Russ.)
10. Nasiha H.J., Shanmugam P., Sundaravadivelu R. Estimation of sediment settling velocity in estuarine and coastal waters using optical remote sensing data. *Advances in Space Research*. 2019;63(11):3473–3478. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.02.023>
11. Winterwerp J.C. A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Research*. 1998;36(3):309–326. <https://doi.org/10.1080/00221689809498621>
12. Lee B.J., Fettweis M., Toorman E., Molz F.J. Multimodality of a particle size distribution of cohesive suspended particulate matters in a coastal zone. *Journal of Geophysical Research*. 2012;117(C3):C03014. <https://doi.org/10.1029/2011JC007552>
13. Lazzari S., Nicoud L., Jaquet B., Lattuada M., Morbidelli M. Fractal-like structures in colloid science. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2016;235:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.05.002>
14. Jungblut S., Joswig J.-O., Eychmüller A. Diffusion- and reaction-limited cluster aggregation revisited. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019;21(10):5723–5729. <https://doi.org/10.1039/c9cp00549h>
15. Pashminehazar R., Kharaghani A., Tsotsas E. Determination of fractal dimension and prefactor of agglomerates with irregular structure. *Powder Technology*. 2019;343:765–774. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.046>
16. Shi W., Wang M. Characterization of suspended particle size distribution in global highly turbid waters from VIIRS measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019;124(6):3796–3817. <https://doi.org/10.1029/2018JC014793>

### Информация об авторах

**Остапенко Сергей Павлович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук; г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: s.ostapenko@ksc.ru

**Месяц Светлана Петровна** – ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук; г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: s.mesyats@ksc.ru

### Information about the authors

**Sergey P. Ostapenko** – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation; e-mail: s.ostapenko@ksc.ru

**Svetlana P. Mesyats** – Leading Researcher, Head of Laboratory, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation; e-mail: s.mesyats@ksc.ru

### Article info

Received: 19.11.2022

Revised: 02.12.2022

Accepted: 02.12.2022

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.11.2022

Поступила после рецензирования: 02.12.2022

Принята к публикации: 02.12.2022