

**Исследование характера распространения взвешенного вещества при влиянии фациально-генетических характеристик донных отложений**

**Ю. Е. Катанов\*, И. О. Зубченко, А. В. Тарасенко, С. В. Воробьева**

*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия*

*\*e-mail: katanov-juri@rambler.ru*

*Аннотация.* Целью данного исследования является получение математической модели для оценки влияния фациально-генетических характеристик донных отложений на характер распространения взвешенного вещества при проведении дноуглубительных работ.

Рассмотрена проблема, связанная с пагубным влиянием донных отложений при проведении гидротехнических работ на экологическое состояние водного объекта. Повышение уровня техногенной мутности приводит к перераспределению теплопроводности водных масс и соответствующему ухудшению среды обитания гидробионтов. Тогда разработка математической модели распространения взвеси является актуальной задачей, решение которой позволит проанализировать площадь распространения каждой из фаций донного отложения при проведении дноуглубительных работ.

Разработана математическая модель распространения фаций взвешенного вещества при проведении дноуглубительных работ на базе метода конечных разностей. Разработано программное обеспечение для моделирования и визуального представления процесса распространения фаций взвешенного вещества в водном пространстве реки Горин при проведении дноуглубительных работ, при помощи программных средств языка C#, программной среды разработки Visual Studio.

Научной новизной выполненной работы является качественная и количественная оценка распространения взвешенных веществ при проведении дноуглубительных работ в условиях гидрогеологической неопределенности.

*Ключевые слова:* взвешенное вещество; турбулентная диффузия; характер распространения; фация; экологическое состояние; моделирование

**Investigation of the nature of suspended matter under the influence of the facies-genetic characteristics of bottom sediments**

**Yuri E. Katanov\*, Ilya O. Zubchenko, Alexandr V. Tarasenko, Seema V. Vorobjeva**

*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia*

*\*e-mail: katanov-juri@rambler.ru*

*Abstract.* The purpose of this study is to obtain a mathematical model to assess the influence of the facies and genetic characteristics of bottom sediments on the distribution of suspended matter during dredging.

The addressed problem is associated with the detrimental effect of bottom sediments during hydraulic works on the ecological state of a water body. An increase in the level of technogenic turbidity leads to redistribution of the thermal conductivity of water masses and corresponding deterioration in the habitat of aquatic organisms. The development of a mathematical model for the distribution of sus-

pended matter is an urgent task, the solution of which will allow us to analyze the area of distribution of each of the facies of bottom sediment during dredging operations.

A mathematical model of the distribution of facies of suspended matter during dredging operations based on the finite difference method has been developed. Software for modeling and visual representation of the process of propagation of facies of suspended matter in the water space of the Gorin River during dredging operations has been developed using C# software, Visual Studio software development environment.

The scientific novelty of the performed work is a qualitative and quantitative assessment of the distribution of suspended solids during dredging operations under conditions of hydrogeological uncertainty.

*Key words:* suspended matter; turbulent diffusion; distribution pattern; facies; ecological state; modeling

### **Введение**

В процессе седиментации взвешенных веществ флювиальных объектов формируются донные отложения различной протяженности, толщины и состава [1, 2]. Для оценки средней скорости распространения взвешенных веществ и траекторий их накопления необходимо учитывать следующие два процесса:

- осадконакопление — процесс аккумуляции тонко- и крупнодисперсных минеральных частиц на единицу площади их пространственного распространения с учетом гидроморфного почвообразования в прибрежных отложениях [3, 4];
- илонакопление — процесс аккумуляции тонкодисперсных взвесей пелитовой/алевроитовой фракций на единицу площади их распространения, в сочетании с накоплением органических и биогенных веществ, диффузионный обмен между которыми в водной толще будет способствовать, как самоочищению экосистемы, так и вероятности вторичного загрязнения воды илом при взмучивании.

Реализация комплекса дноуглубительных работ оказывает негативное воздействие на экологическое состояние водного объекта [5, 6], что неизбежно приводит к нарушению жизненной активности биологических организмов в зонах проводимых технологических мероприятий.

Следовательно, проведение технологических работ в границах водных объектов, например, строительство буровых платформ, прокладка подводных трубопроводов, дноуглубительные работы и пр., в результате которых образуются твердые взвешенные частицы, допускается только в соответствии с технологическими нормами Федерального агентства по рыболовству РФ [7–9].

Этапы создания математической модели распространения взвеси, локализованной в разных частях водного объекта, реализуются в два этапа [10].

Первый этап — формирование базы данных о геометрии водного объекта, локальный забор и анализ состава взвеси при дальнейшем расчете скоростей течений водных объемов в предполагаемом районе производства дноуглубительных работ.

Второй этап — расчет вариантов траекторий распространения элементов поля многокомпонентной взвеси.

Поскольку отсутствует единая методология исследования особенностей донных отложений, то привлечение численных методов для описания закономерностей гидродинамических процессов в водном объекте [8, 11] (скорость и особенности течения, турбулентная диффузия, изменение поля температуры, принципов формирования зон мутности и пр.) при распространении объемов взвешенного вещества является актуальной задачей.

#### **Объект и методы исследования**

В качестве объекта моделирования была выбрана река Горин, которая является левым притоком Амура. Данная река была выбрана благодаря разнообразию гранулометрического состава, который варьируется от галечников до пылеватых частиц.

В выбранной точке моделирования река имеет следующие гидрогеологические характеристики:

- глубина: 2,6 м;
- скорость течения: 0,30 м/с;
- радиус фракции, мм — объем от общего состава частиц, %:  
10–50 мм — 31,4 %; 7–10 мм — 8,5 %; 5–7 мм — 4,9 %; 3–5 мм — 4,1 %; 1–3 мм — 8,6 %; 0,5–1 мм — 5,3 %; 0,25–0,5 мм — 21,2 %; 0,1–0,25 мм — 14,3 %; < 0,1 мм — 1,7 %.

Методы исследования — феноменологический подход, геолого-математическое моделирование.

#### **Результаты**

Разномасштабные зоны мутности водных объектов формируются в процессе проведения гидротехнических работ, связанных с отвалом/изъятием толщ донного грунта. На фоне таких мероприятий рост концентрации взвешенных веществ в реке приводит к ухудшению фильтрационно-вещественных свойств системы «водная толща — донные отложения», изменению глубин русла и нарушению экологии исследуемого водного объекта.

Поэтому базовыми динамическими характеристиками зон мутности водных объектов являются размеры фракций донных отложений, а также производительность гидромеханических устройств, фиксирующих удаленные шлейфа их физических полей от источника взмучивания.

Данные характеристики удовлетворительно коррелируются с гидродинамическими особенностями водных объектов в соответствующих границах, и определяют общий гранулометрический состав взвешенных частиц по их крупности.

Для частиц с диаметром менее 0,1 мм характерно формирование устойчивых полей мутности с увеличенной силой сопротивления к осаждению. Поэтому для математического учета эффективной крупности необходим коэффициент, соответствующий доле взвешенных частиц в общем объеме, определяющий их продолжительное замедленное осаждение.

Системный учет критериев вероятного распространения взвеси при проведении дноуглубительных работ базируется на агрегировании следующих этапов:

- классификация входной информации по группам элементов взвеси основывается в первую очередь на размере забираемых со дна частиц, распространяющихся в водном объекте;

- итеративный процесс распространения частиц заключается в определении содержания взвеси в каждой точке водного объекта на  $i$ -ом шаге расчета по времени (где  $i$  — экспериментально определяемая величина);
- аналитико-графическое представление результатов математического моделирования в виде локальных тепловых карт объемов взвеси в различных участках водного объекта.

### Описание математической модели

Верхний слой гранулометрического состава косы донных отложений (самомостка) реки Горин представлен более крупными фациями  $D_B$ , поскольку в первую очередь на него происходит воздействие водных толщ.

Средний диаметр взвешенных частиц верхнего слоя формируется руслоформирующим расходом в соответствии со скоростями течения. Для реки Горин верхний слой донных отложений представлен песчано-гравийными фациями. Нижележащие отложения песчано-гравийных фаций будут мало подвержены или не подвержены вовсе значимому воздействию водных потоков, поэтому их фациально-генетические характеристики представлены более мелкими фракционными кластерами минеральных частиц.

При стохастическом моделировании распространения взвеси в водном объекте, при дноуглубительных работах, была использована модель турбулентной диффузии — конвекции [2], представленная полуэмпирическим дифференциальным уравнением в частных производных для двух измерений

$$\frac{dC}{dt} + \frac{d}{dx} u \cdot C + \frac{d}{dy} v \cdot C = \frac{d}{dx} D \frac{dC}{dx} + \frac{d}{dy} D \frac{dC}{dy}. \quad (1)$$

Для численного решения уравнения (1) выбран метод конечных разностей (МКР) с явной схемой, состоящий в замене частных производных соответствующими конечно-разностными аппроксиматорами. В итоге поиск решения сводится к сеточной дискретизации исходной дифференциальной задачи.

При использовании данного метода моделируемая среда распространения взвеси представляется в виде голоморфной сетки с фиксированным количеством узлов. Аппроксимируя частные производные дифференциального уравнения (1) посредством МКР, получаем систему линейных алгебраических уравнений для идентификации значений концентрации взвешенных частиц, как локальной характеристики в каждом узле сетки.

Приближенным аналогом уравнения (1), посредством привлечения численных методов, является зависимость для нахождения значений концентрации вещества в каждой ячейке сетки моделируемого объекта [12–16]:

$$C_{i,j}^n = C_{i,j}^{n-1} + D \cdot \frac{\tau}{h^2} \cdot (C_{i+1,j}^{n-1} - 2C_{i,j}^{n-1} + C_{i-1,j}^{n-1}) + D \cdot \frac{\tau}{h^2} \cdot (C_{i,j+1}^{n-1} - 2C_{i,j}^{n-1} + C_{i,j-1}^{n-1}) + \frac{\tau}{h} (V_x \cdot (C_{i-1,j}^{n-1} - C_{i,j}^{n-1}) + V_y \cdot (C_{i,j-1}^{n-1} - C_{i,j}^{n-1})) - \frac{\tau}{h} \cdot \frac{V_{sedim}}{H}, \quad (2)$$

где  $n$  — индекс временного слоя;  $\tau$  — шаг по времени;  $h$  — шаг по пространству;  $D$  — коэффициент турбулентной диффузии;  $V_x$  — компонента

скорости по оси  $X$ ;  $V_y$  — компонента скорости по оси  $Y$ ;  $V_{sedim}$  — скорость седиментации частиц грунта;  $H$  — средняя глубина водоема в узле  $(i, j)$ .

Согласно формуле Стокса [9, 10], аппроксимируя ее для данного случая исследования, скорости первичной седиментации минеральных частиц, размер которых  $< 10$  мкм, могут быть представлены в следующей форме:

$$v = \frac{2 \cdot g \cdot (p - p_0) \cdot r^2}{9 \cdot \mu}, \quad (3)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести;  $\mu$  — динамическая вязкость водной среды;  $r$  — радиус минеральных частиц;  $p, p_0$  — плотности минеральных частиц и водной среды.

Для минеральных частиц диаметра  $> 10$  мкм скорость первичной седиментации целесообразно исследовать по классическому закону [17–19]: системно рассматривая влияние силы притяжения и силы Архимеда на характер распространения минеральных частиц (при разработке ПО), необходимо также учитывать и силу трения, действующую на сферические объекты (частицы) в жидкости

$$F = -6 \cdot \pi \cdot r \cdot \mu \cdot v, \quad (4)$$

где  $r$  — радиус сферического объекта;  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости;  $v$  — скорость распространения частиц.

При дноуглубительных работах нарушается верхний слой песчано-гравийных фаций, что приводит к соответствующему уменьшению диаметра его фракционного состава с дальнейшей сетью наносов. Поскольку фракционный состав представлен различной гидрогеологической неоднородностью частиц<sup>1</sup>, то посредством распространения их более мелких фракций происходит загрязнение водного объекта [20].

Для разработки песчано-гравийного дна речных русел целесообразнее использовать технологию поперечных прорезей по двум причинам:

- 1) механические нарушения верхнего слоя дна отсутствуют, что влияет на формирование значительных объемов взвешенных минеральных частиц в водном объекте;
- 2) снижение кривой свободной поверхности на вышерасположенных участках дна (по отношению к низкой отметке русла) также отсутствует; обратный процесс привел бы к увеличению скоростей водного потока с дальнейшим размывом дна.

В соответствии с поставленной целью исследования был выполнен расчет масштаба распространения облака взвеси в водной толще при соответствующей эффективной гидравлической крупности частиц различных полидисперсных взвесей.

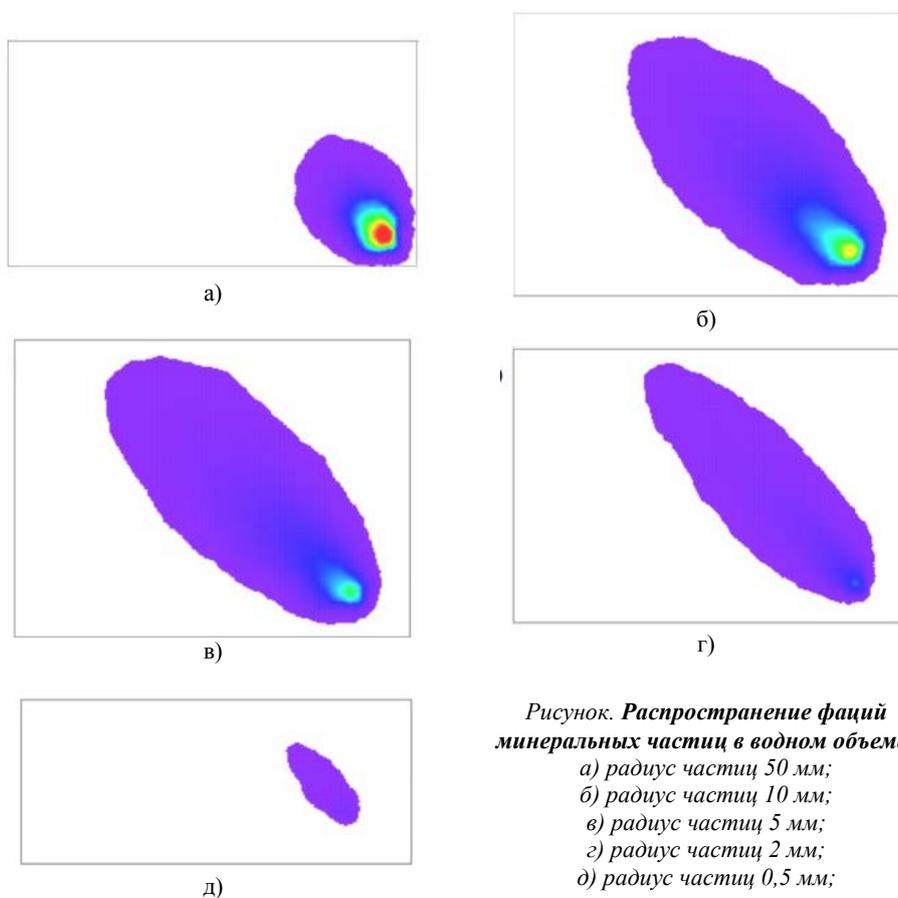
Результаты моделирования распространения фаций взвешенного вещества, полученные на основе данных о водном объекте и гранулометрическом составе донных отложений, без учета границ водного объекта и береговых линий, представлены на рисунке.

<sup>1</sup> Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 N 74-ФЗ (текст с изм. и доп. на 2020 г.). – Москва : Эксмо, 2020. – 64 с.

Из рисунка видно, что в начальные моменты времени масштабы облака взвешенных частиц не меняются резко, поскольку требуется определенное время для достижения дна водоема.

Поэтому на начальном этапе величина эффективной гидравлической крупности частиц не будет информативной характеристикой по идентификации техногенной мутности. Дальнейшее увеличение скорости распространения облака взвеси будет связано с последовательным осаждением на дно минеральных частиц различных фракций.

Выполненное моделирование позволяет идентифицировать форму и масштаб шлейфа загрязнения, после взброса донных отложений на базе двумерного уравнения массопереноса и уравнения Стокса для различных фракций минеральных частиц.



*Рисунок. Распространение фаций минеральных частиц в водном объеме:  
а) радиус частиц 50 мм;  
б) радиус частиц 10 мм;  
в) радиус частиц 5 мм;  
г) радиус частиц 2 мм;  
д) радиус частиц 0,5 мм;*

Стоит отметить, что величина концентрации взвешенных веществ (с радиусом частиц менее 0,5 мм) за пределами зон гидродинамического влияния является признаком наличия остаточной мутности. Если же водный поток «удерживает» остаточную мутность без вмешательства технологических механизмов, то это свидетельствует о естественных гидродинамических особенностях данной водной толщи.

Оценка гидродинамического потенциала такого потока будет однозначно сопряжена с его транспортирующей способностью. При естественных гидрологических режимах в руслах рек с замедленным водообменом будет минимальная нагрузка взвешенных частиц в водных массах.

Характеристики малой глубины и разноскоростного водообмена в границах реки Горин определяют относительно равномерное распределение параметра максимально возможной мутности в водной толще (в среднем порядка несколько десятков мг/л).

Таким образом, для акватории постоянной глубины поиск решения задачи массопереноса взвеси, усредненного по вертикали, сводится к скорости распространения полидисперсных частиц с  $M$  фракциями на базе  $N$  одномерных эволюционных уравнений для каждого случая.

Эффективная гидравлическая крупность взвешенных веществ, учитываемая при оценке адсорбционных свойств водного дна, аналогично может быть использована при одномерных исследованиях распространения загрязнений в руслах рек.

### **Выводы**

На основе результатов моделирования можно сделать вывод о том, что с уменьшением размеров зерен радиусом от 50 до 5 мм происходит увеличение площади седиментации взвешенных частиц для соответствующих фаций (см. рис. а, б, в); при размере зерен от 5 мм и меньше концентрация взвеси в каждой точке водного объекта становится меньше (уменьшение площади седиментации при заданном уровне значимости (см. рис. г, д), что свидетельствует об уменьшении степени пагубного влияния осадконакопления и увеличения радиусов зон мутности.

В качестве рекомендации для корректной работы разработанного ПО следует учитывать максимально допустимую для моделирования скорость течения водного объекта  $\sim 3$  м/с при соответствующей глубине не более 5 метров.

Результаты первичной математической модели распространения взвешенных составов в водных ресурсах были представлены на семинаре кафедры прикладной геофизики Тюменского индустриального университета.

### **Библиографический список**

1. Дроздов, В. В. Влияние процесса дноуглубительных работ на экологическое состояние акваторий Выборгского залива / В. В. Дроздов, А. В. Коробков. – Текст : непосредственный // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – № 12. – С. 80–96.
2. Катанов, Ю. Е. Механизмы и принципы моделирования деформационно-пространственной неустойчивости горных пород / Ю. Е. Катанов. – Текст : непосредственный // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2014. – № 11. – С. 19–23.
3. Зубченко, И. О. Моделирование распространения взвешенных веществ водными течениями при проведении дноуглубительных работ / И. О. Зубченко. – Текст : непосредственный // Вестник магистратуры. – 2020. – № 10–4 (109). – С. 6–8.
4. Катанов, Ю. Е. Математическая модель процесса накопления и пространственно-временной эволюции ансамбля элементарных повреждений как единого динамического

процесса / Ю. Е. Катанов. – Текст : непосредственный // Нефть, газ и бизнес. – 2014. – № 9. – С. 60–63.

5. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 3-е изд. перераб. и доп. – Москва : Наука, 1986. – 736 с. – Текст : непосредственный.

6. Насыров, В. В. О применимости закона Стокса / В. В. Насыров, М. Г. Насырова. – DOI 10.24147/2222-8772.2020.2.40-48. – Текст : непосредственный // Математические структуры и моделирование. – 2020. – № 2 (54). – С. 40–48.

7. Катанов, Ю. Е. Оценка эффективности методов принятия решений в нечетких условиях / Ю. Е. Катанов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2011. – № 5. – С. 106–111.

8. Рыжков, С. С. Влияние дноуглубительных работ на морские экосистемы / С. С. Рыжков, Ю. Б. Брезкун. – Текст : непосредственный // Электронный вестник наук. – 2010. – № 2. – С. 2–4.

9. Гранулометрический и микроэлементный состав донных отложений реки Амур в среднем и нижнем течении. Тихоокеанская геология / С. Е. Сиротский, Г. В. Харитонова, В. И. Ким [и др.]. – Текст : непосредственный // Тихоокеанская геология. – 2014. – Т. 33, № 3. – С. 88–98.

10. Методы математического моделирования окружающей среды / А. В. Колдоба, Ю. А. Повещенко, Е. А. Самарская В. Ф. Тишкин ; отв. ред. Н. В. Змитренко ; Российская академия наук, Ин-т математического моделирования. – Москва : Наука, 2000. – 254 с. – Текст : непосредственный.

11. Катанов, Ю. Е. Моделирование процесса массопереноса в углеводородных системах / Ю. Е. Катанов, А. О. Лысов. – Текст : непосредственный // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна : материалы VII Всероссийской научно-технической конференции (посвященной 100-летию Бабакова Николая Константиновича), 15 апреля 2011 года / М-во образования и науки Российской Федерации, Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2011. – С. 178–180.

12. Тихонов, А. Н. Дифференциальные уравнения / А. Н. Тихонов, А. Б. Васильева, А. Т. Свешников. – Москва : Наука, 1985. – 742 с. – Текст : непосредственный.

13. Экологическая уязвимость береговой зоны восточной части Финского залива к дреджингу / М. Б. Шилин, В. Б. Погребов, С. В. Лукьянов [и др.]. – Текст : непосредственный // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2012. – № 25. – С. 107–122.

14. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий ; отв. ред. Р. И. Солоухин ; АН СССР, Ин-т хим. физики. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Наука, 1987. – 490. – Текст : непосредственный.

15. Юрасов, С. Н. Вывод математической модели и разработка методики расчета турбулентной диффузии взвеси в водном потоке / С. Н. Юрасов, О. В. Сергиенко // Климатология, метеорология и гидрология : сборник. – 2008. – Вып. 50. – С. 401–406. – Текст : непосредственный.

16. Blaise, S. Influence of the turbulence closure scheme on the finite-element simulation of the upwelling in the wake of shallow-water island / S. Blaise, E. Deleersnijder, L. White, J.-F. Remacleac. – DOI 10.1016/j.csr.2007.06.003. – Direct text // Continental Shelf Research. – 2007. – Vol. 27, Issue 18, – P. 2329–2345.

17. Cancino, L. Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems : Part I : Description of the numerical models / L. Cancino, R. Neves. – DOI 10.1016/S0924-7963(99)00035-4. – Direct text // Journal of Marine Systems. – 1999. – Vol. 22, Issues 2–3. – P. 105–116.

18. Dey, S. Scour at Submerged Cylindrical Obstacles under Steady Flow / S. Dey, R. V. Raikar, A. Roy. – DOI 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(105). – Direct text // Journal of Hydraulic Engineering. – 2008. – Vol. 134, Issue 1. – P. 105–109.

19. Erfemeijer, P. L. A. Environmental impacts of dredging on seagrasses : a review / P. L. A. Erfemeijer, R. R. R. Robin Lewis. – DOI 10.1016/j.marpolbul.2006.09.006. – Direct text // Marine Pollution Bulletin. – 2006. – Vol. 52, Issue 12. – P. 1553–1572.

20. Three-dimensional island wakes in the field, laboratory experiments and numerical models / E. Wolanski, T. Asaeda, A. Tanaka, E. Deleersnijder. – DOI 10.1016/0278-4343(95)00087-9. – Direct text // Continental Shelf Research. – 1996. – Vol. 16, Issue 11. – P. 1437–1452.

## References

1. Drozdov, V. V., & Korobkov, A. V. (2010). Influence of dredging works on an ecological condition water areas of the Vyborg Gulf. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal, (12), pp. 80-96. (In Russian).
2. Katanov, Yu. E. (2014). Mechanisms and principles of modeling of rocks the deformation-spatial instability. Construction of oil and gas wells on land and at sea, (11), pp. 19-23. (In Russian).
3. Zubchenko, I. O. (2020). Modeling the distribution of suspended solids by water currents during dredging. Vestnik Magistratury, (10-4(109)), pp. 6-8. (In Russian).
4. Katanov, Yu. E. (2014). Mathematical model the process of accumulation and the spatial-temporal evolution of an ensemble of elemental damage as a single dynamic process. Oil, Gas and Business, (9), pp. 60-63. (In Russian).
5. Landau, L. D., & Lifshits, E. M. (1986). Theoretical physics. In 10 volumes. Vol. VI. Hydrodynamics. 3<sup>rd</sup> edition revised and expanded. Moscow, Nauka Publ., 736 p. (In Russian).
6. Nasyrov, V. V., & Nasyrova, M. G. (2020). About the Stokes law applicability. Mathematical structures and modeling, (2(54)), pp. 40-48. (In Russian). DOI: 10.24147/2222-8772.2020.2.40-48
7. Katanov, Yu. E. (2011). Evaluation of the efficiency of making decision methods in Uncertain conditions. Higher Educational Institutions News. Neft' i Gas, (5), pp. 106-111. (In Russian).
8. Ryzhkov, S. S., & Brezkun, Yu. B. (2010). Influence of dredging works on marine ecosystems. Electronic Bulletin of Sciences, (2), pp. 2-4. (In Russian).
9. Sirotskiy, S. E., Kharitonova, G. V., Kim, V. I. Klimin, M. A., Chizhikova, N. P., Tyugai, Z.,... Utkina, E. V. (2014). The granulometric and microelemental composition of bottom sediments in the Amur River middle and lower reaches. Tikhookeanskaya Geologiya, 33(3), pp. 88-98. (In Russian).
10. Koldoba, A. B., Poveschenko, Yu. A., Samarskaya, E. A., & Tishkin, V. F. (2000). Metody matematicheskogo modelirovaniya okruzhayushchey sredy. Moscow, Nauka Publ., 254 p. (In Russian).
11. Katanov, Yu. E. & Lysov, A. O. (2011). Modelirovanie protsessa massoperenosa v uglevodorodnykh sistemakh. Geologiya i neftegazonosnost' Zapadno-Sibirskogo megabassejna: materialy VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (posvyashchennoy 100-letiyu Babakova Nikolaya Konstantinovicha), April, 15, 2011. Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University Publ., pp. 178-180. (In Russian).
12. Tikhonov, A. N., Vasil'eva, A. B., & Sveshnikov, A. T. (1985). Differentsial'nye uravneniya. Moscow, Nauka Publ., 742 p. (In Russian).
13. Shilin, M. B., Pogrebov, V. B., Mamaeva, M. A., Lukyanov, S. V., & Lednova, Yu. A. (2012). Ecological sensitivity of the coastal zone of the eastern gulf of Finland (the Baltic Sea) to dredging. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal, (25), pp. 107-96. (In Russian).
14. Frank-Kamenetsky, D. A. (1987). Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike. 3<sup>rd</sup> edition revised and expanded. Moscow, Nauka Publ., 490 p. (In Russian).
15. Yurasov, S. N., & Sergienko, O. V. (2008). Vyvod matematicheskoy modeli i razrabotka metodiki rascheta turbulentnoy diffuzii vzvesi v vodnom potoke. Klimatologiya, meteorologiya i gidrologiya: sbornik, (50), pp. 401-406. (In Russian).
16. Blaise, S., Deleersnijder, E., White, L., & Remacleac, J.-F. (2007). Influence of the turbulence closure scheme on the finite-element simulation of the upwelling in the wake of shallow-water island. Continental Shelf Research, 27(18), pp. 2329-2345. (In English). DOI: 10.1016/j.csr.2007.06.003
17. Cancino, L. & Neves, R. (1999). Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems: Part I: Description of the numerical models. Journal of Marine Systems, 22(2-3), pp.105-116. (In English). DOI: 10.1016/S0924-7963(99)00035-4
18. Dey, S., Raikar, R. V. & Roy, A. (2008). Scour at Submerged Cylindrical Obstacles under Steady Flow. Journal of Hydraulic Engineering, 134(1), pp. 105-109. (In English). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(105)
19. Erfemeijer, P. L. A., & Robin Lewis, R. R. (2006). Environmental impacts of dredging on seagrasses: a review. Marine pollution bulletin, 52(12), pp. 1553-1572. (In English). DOI: 10.1016/j.marpolbul.2006.09.006

20. Wolanski, E. Asaeda, T., Tanaka, A., & Deleersnijder, E. (1996). Three-dimensional island wakes in the field, laboratory experiments and numerical models. *Continental Shelf Research*, 16(11), pp. 1437-1452. (In English). DOI: 10.1016/0278-4343(95)00087-9

#### **Сведения об авторах**

**Катанов Юрий Евгеньевич**, к. г.-м. н., доцент кафедры прикладной геофизики, ведущий научный сотрудник лаборатории технологий капитального ремонта скважин и интенсификации притока, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: katanov-juri@rambler.ru

**Зубченко Илья Олегович**, магистрант 2 курса, кафедра прикладной геофизики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

**Тарасенко Александр Владимирович**, младший научный сотрудник лаборатории технологий капитального ремонта скважин и интенсификации притока, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

**Воробьева Сима Васильевна**, д. т. н., профессор кафедры техносферной безопасности, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

#### **Information about the authors**

**Yuri E. Katanov**, Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor at the Department of Applied Geophysics, Leading Researcher Laboratory of Well Workover and Stimulation Technologies, Industrial University of Tyumen, e-mail: katanov-juri@rambler.ru

**Ilya O. Zubchenko**, 2<sup>nd</sup> year Undergraduate Student, Department of Applied Geophysics, Industrial University of Tyumen

**Alexandr V. Tarasenko**, Junior Researcher Laboratory of Well Workover and Stimulation Technologies, Industrial University of Tyumen

**Seema V. Vorobjeva**, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Technosphere Safety, Industrial University of Tyumen