



**ТРУДЫ**  
**ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**  
**С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ**  
**«СОВРЕМЕННАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ: АКТУАЛЬНЫЕ**  
**ВОПРОСЫ НАУКИ, ПРАКТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ»**

**Г. СОЧИ, РОССИЯ 17-23 СЕНТЯБРЯ 2023 Г.**

Московский Государственный Университет  
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет

Труды  
Всероссийской научной конференции  
с международным участием  
«Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки,  
практики и образования»  
г. Сочи, Россия 17-23 сентября 2023 г.

Под редакцией  
д.г.-м.н. С.П. Позднякова  
к.г.-м.н. Е.С. Казак

Технические редакторы  
Н.Е. Шиндина  
М.Д. Неуважаева

Москва  
2023

УДК 556.5

### Труды

Всероссийской научной конференции с международным участием «Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования». М.: МГУ, 2023. — 619 с.

Коллективная монография, изданная по материалам докладов участников Всероссийской научной конференции с международным участием «Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования», которая проводилась 17-23 сентября 2023 года на базе пансионата МГУ Буревестник в г. Сочи, Россия и была посвящена 70-летию основания кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Рассмотрен широкий круг вопросов современной гидрогеологии, включая теоретические аспекты формирования ресурсов подземных вод, разработку методов расчетов и моделирования гидрогеологических процессов, проблемы формирования химического состава подземных вод, разработку и обоснование геофильтрационных и геомиграционных моделей конкретных объектов, нефтяную гидрогеологию и современные проблемы гидрогеологического образования.

УДК 556.5

УДК 556.3

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОНИЦАЕМОСТИ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ДИСПЕРСИЮ ВЕЩЕСТВА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ (ДОЛИНА Р. ДУНАЙ, УЧАСТОК СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС ПАКШ II)

М.В. Вилькина\*<sup>1,2</sup>, А.М. Никуленков<sup>1,2</sup>, В.Г. Румынин<sup>1,2</sup>, Л.Н. Синдаловский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН, Санкт-Петербург, Россия,

E-mail: wilkina.mari@hgepro.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

На основе вариограммного анализа результатов опытно-фильтрационных опробований аллювиального водоносного горизонта проанализированы модели, описывающие макродисперсию вещества в стохастически неоднородной по проницаемости среде. Построены графики одномерных решений  $C(x, t)$  при различных функциональных зависимостях  $\delta_L(x)$ , а также сопоставлены расчетные значения продольной дисперсивности  $\delta_L$  с ранее опубликованными данными.

**Ключевые слова:** вариограммы коэффициента фильтрации, макродисперсия, загрязнение подземных вод, ANSDIMAT

## IMPACT OF THE ALLUVIAL DEPOSITS' PERMEABILITY ANISOTROPY ON THE DISPERSION IN GROUNDWATER (DANUBE'S RIVER VALLEY, PAKS II NPP CONSTRUCTION SITE)

M.V. Vilkina\*<sup>1,2</sup>, A.M. Nikulenkov<sup>1,2</sup>, V.G. Rumynin<sup>1,2</sup>, L.N. Sindalovskiy<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg,

Russian Federation, E-mail: wilkina.mari@hgepro.ru

<sup>2</sup>St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation

### Abstract

Based on the variogram analysis of the pumping tests' results carried out in the alluvial aquifer, the models describing macrodispersion processes in a stochastically heterogeneous medium have been studied. The plots of the one-dimensional solutions  $C(x, t)$  for different functional relationships  $\delta_L(x)$  have been plotted. The calculated longitudinal dispersion  $\delta_L$  values are compared with previously published materials.

**Key Words:** hydraulic conductivity variogram, macrodispersion, groundwater contamination, ANSDIMAT

## Введение

В основании проектируемой АЭС Пакш II лежит достаточно мощная толща обводненных четвертичных отложений, дренирование которых является одним из мероприятий, обеспечивающих инженерную защиту строительства станции. Это обусловило выполнение инженерных изысканий, в том числе, связанных с детальным изучением фильтрационных свойств отложений. Помимо вопросов обоснования строительного и эксплуатационного дренажа, существенное значение имеет определение гидрогеологических параметров, контролирующих миграцию загрязняющих веществ, либо уже присутствующих в подземных водах (следствие эксплуатации первой очереди станции Пакш I), либо веществ, связанных с потенциальными авариями на новых энергоблоках АЭС Пакш II. Верхняя часть гидрогеологического разреза представлена аллювиальным водоносным горизонтом, изучение которого представляет наибольший интерес с позиций оценки химического и радиационного загрязнения подземных вод в районе АЭС.

## Методы исследований

Масштабы загрязнения подземных вод в условиях плановой фильтрации определяются конвекцией (действительной скоростью фильтрации,  $u$ ), фактором сорбционной задержки ( $R$ ), радиоактивным распадом (константой распада  $\lambda$ ), рассеивающими эффектами – дисперсией фронта загрязнения, компоненты которой ( $D_L$  и  $D_T$ ) в «полевых» условиях контролируются пространственной изменчивостью проницаемости пород (проводимости, или коэффициента фильтрации) [5; 9; 10]. Согласно традиционным представлениям, считается, что коэффициенты дисперсии линейно связаны со скоростью  $u$ :

$$D_L = \delta_L u, \quad D_T = \delta_T u, \quad (1)$$

где  $\delta_L$  и  $\delta_T$  – «макроскопические» аналоги коэффициентов поровой дисперсивности.

**Асимптотическое поведение коэффициентов дисперсии.** В строгой постановке для описания фильтрации и миграционного процесса (переноса вещества подземными водами) в неоднородных водоносных горизонтах используются стохастические модели, в которых изменчивость коэффициента фильтрации  $k$  подчиняется логнормальному закону распределения (т.е.  $Y = \ln k$  – функция гауссовского распределения) и характеризуется некоторым корреляционным масштабом  $l_Y$ , определяющим тренды пространственной изменчивости данного свойства  $Y$ . Их анализ позволяет определить, наряду с эффективной проводимостью [5] в задачах фильтрации, структуру эффективных коэффициентов дисперсии

для построения упрощенных аналитических моделей, учитывающих масштабные эффекты при миграции в гетерогенных средах [3–7].

Коэффициенты дисперсивности, рассчитываемые в рамках представлений о Фиковом характере миграции, являются в общем случае нестационарными функциями [ $\delta = f(t)$ , или  $\delta = f(x)$ ]. Так, анализ трехмерного процесса в изотропной стохастической среде [3] позволил получить выражения для основных компонент коэффициента дисперсии  $D_{ij}(t)$  или дисперсивности  $\delta_{ij}(t)$ . Для начальных моментов времени ( $\tau = ut/l_Y \ll 1$ ,  $\tau$  – нормированное время) формулы для коэффициентов продольной и поперечной дисперсивности имеют вид:

$$\delta_L = \frac{8}{15} \sigma_Y^2 ut, \quad \delta_T = \frac{1}{15} \sigma_Y^2 ut. \quad (2)$$

Оба коэффициента линейно связаны с дисперсией  $\ln k$ ,  $\sigma_Y^2$ , не зависят от корреляционного масштаба и растут пропорционально времени, или, поскольку  $ut \approx x$ , линейно зависят от расстояния, пройденного концентрационным фронтом в пористой среде:

$$\delta_L = \frac{8}{15} \sigma_Y^2 x, \quad \delta_T = \frac{1}{15} \sigma_Y^2 x. \quad (3)$$

Близкий результат получен в ряде других работ [4; 5; 6; 7]. По прошествии довольно больших периодов времени ( $\tau \gg 1$ ), наблюдается стабилизация коэффициентов дисперсивности, определяемая асимптотикой:

$$\delta_L = \sigma_Y^2 l_Y, \quad \delta_T = \frac{\sigma_Y^2}{8} (\delta'_L + 3\delta'_T), \quad (4)$$

где  $\delta'_L$  и  $\delta'_T$  – показатели поровой (микроскопической) дисперсивности.

Анализ 3D процессов в средах с анизотропной корреляционной структурой также может проводиться в рамках асимптотических моделей, подобных (2)–(4) [5].

**Одномерные аналитические модели макродисперсии.** Существование двух асимптотик послужило для многих авторов стимулом к разработке аналитических моделей, являющихся альтернативой существующим стохастическим моделям посредством масштабирования коэффициентов дисперсии. Хотя такого рода модели конвективной дисперсии носят эмпирический характер, они могут оказаться полезными для описания транспорта, который демонстрирует поведение, зависящее от пространственно-временного масштаба.

Дж. Пикенс и Г. Гризак [8] предложили несколько функций для коэффициента продольной дисперсивности, зависящей от расстояния:

$$D_L(x) = \delta_L(x)u. \quad (5)$$

Данный тип пространственных функций был впоследствии расширен до функций дисперсии, зависящих от времени [2], полагая справедливым выполнение приближенного равенства:  $\delta_L(x) \approx \delta_L(ut)$ . Преимущество такого преобразования состоит в том, что решения для  $\delta_L(t)$  имеют более простой вид [2].

Аналитические решения уравнений конвективной дисперсии для различных моделей дисперсивности  $\delta_L(x)$  и  $\delta_L(t)$  получаются с помощью преобразований Лапласа или/и Фурье; они представлены специальными функциями или интегралами их включающими. В ряде публикаций решения в замкнутой форме получены с помощью *power series method*. Все упомянутые решения были включены в последнюю версию программного комплекса ANSDIMAT [1]. Например, для определения связи между длиной переноса и коэффициентом дисперсии предлагаются три математических зависимости:

линейная

$$\delta_L = ax; \quad (6)$$

линейная асимптотическая

$$\delta_L = \begin{cases} ax & x \leq x_0, \\ \delta_L^* & x > x_0 \end{cases} \quad (7)$$

экспоненциальная

$$\delta_L = \sigma_y^2 l_y \left[ 1 - \exp\left(\frac{-ax}{l_y}\right) \right] \quad (8)$$

где  $a$  – постоянная,  $\delta_L^*$  – асимптотический максимум дисперсивности. Эти параметры характеризуют масштабно-зависимый процесс одномерного рассеяния растворенного вещества. Аналитические представления этих параметров связываются с автокорреляционной функцией, характеризующей коррелируемое поле распределения  $Y$  – дисперсию  $\ln k$ ,  $\sigma_Y^2$ , и корреляционный масштаб  $Y$ ,  $l_Y$ .

На практике тип функции дисперсивности,  $\delta_L = f(x)$  (или  $\delta_L = f(t)$ ) может быть выбран в соответствии с наблюдаемой взаимосвязью между дисперсией точек концентрационного

распределения,  $\sigma_y^2$ , и средним расстоянием  $x$  (или временем,  $t$ ), устанавливаемым в результате полевых трассерных (опытных) опробований или данных мониторинга.

**Результаты ОФР и их анализ.** В процессе изысканий на площадке строительства АЭС Пакш II было проведено 36 опытных одиночных откачек из скважин на аллювиальный водоносный горизонт, сложенный крупно- и среднезернистыми песками (Рис. 1). Мощность слоя песков достигает 15 м, ниже залегает высоко-проводящая толща, сложенная гравием.

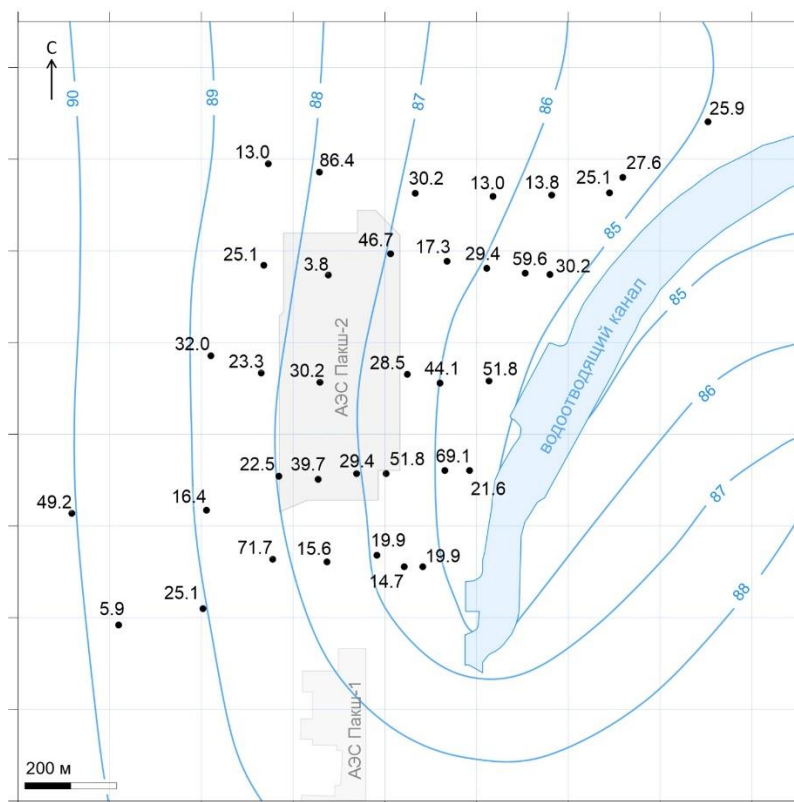


Рис. 1 Карта гидроизогипс аллювиального водоносного горизонта и коэффициенты фильтрации по данным одиночных откачек.

Результаты определения коэффициента фильтрации приведены к основанию натурального логарифма и представлены на графике функции плотности вероятности (Рис. 2).



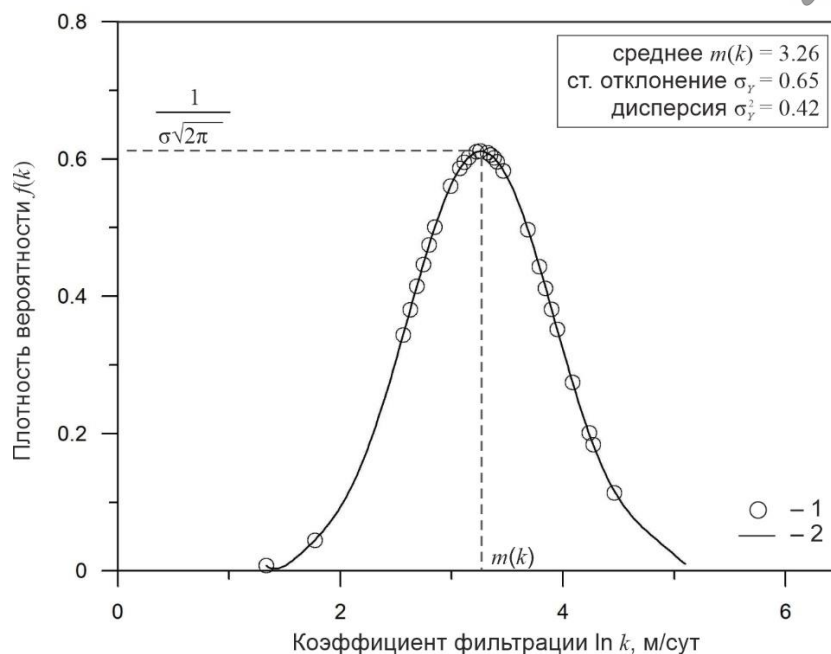


Рис. 2 График функции плотности вероятности

(1 – замеренный коэффициент фильтрации; 2 – функция плотности вероятности).

Как видно из графика, полученные значения обладают свойством логнормального Гауссова распределения и описываются следующим выражением:

$$f(Y) = \frac{1}{\sigma_Y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(Y-m)^2}{\sigma_Y^2}}, \quad (9)$$

где  $f(Y)$  – функция плотности вероятности;  $Y$  – натуральный логарифм коэффициента фильтрации  $k$ ;  $m$  – среднее значение логарифма коэффициента фильтрации;  $\sigma_Y^2$  – дисперсия коэффициента фильтрации;  $\sigma_Y$  – среднеквадратичное отклонение, м/сут.

Так, основные статистические параметры изучаемой толщи принимают следующие значения (в логарифме): дисперсия  $\sigma_Y^2$  равна 0,42, среднее  $m(k)$  равно 3,26. Большое значение дисперсии обусловлено высокой неоднородностью изучаемой толщи. Так, в пределах одного квадратного километра коэффициент фильтрации варьирует от 3,8 до 86,4 м/сут (Рис. 1).

На основе опытных данных была построена экспериментальная неориентированная вариограмма (Рис. 3). В качестве шага (лага) вариограммы принималось среднее расстояние между скважинами, принятое равным 50 м. Экспериментальные данные логарифмов коэффициента фильтрации были аппроксимированы теоретической гауссовой вариограммой. Теоретическая вариограмма принимает следующие значения: дисперсия  $\sigma_Y^2$  равна 0,42, радиус вариограммы (range) равен 105 м. Отметим, что численная дисперсия, полученная из функции плотности вероятности, равна дисперсии вариограммы.

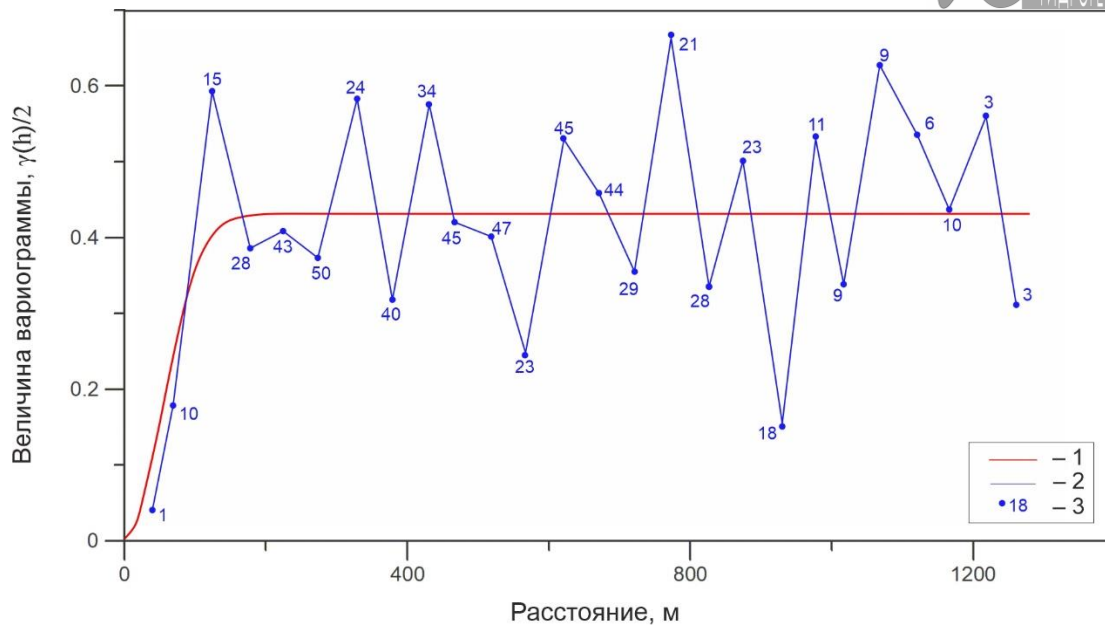


Рис. 3 Экспериментальная и теоретическая вариограммы

(1 – теоретическая вариограмма; 2 – экспериментальная вариограмма; 3 – количество пар скважин, использованных для расчета каждой точки экспериментальной вариограммы).

### Результаты и их обсуждение

Проведенный теоретический анализ и полученные экспериментальные результаты позволяют проанализировать влияние стохастической структуры аллювиального водоносного горизонта на характер дисперсии концентрационных фронтов в случае одномерной миграции в плоскопараллельной фильтрационном потоке. Пусть скорость Дарси  $v = 0,15$  м/сут, активная пористость  $n = 0,25$  ( $u = 0,6$  м/сут), мигрирует инертный стабильный компонент. Из анализа вариограммы  $\sigma_Y^2 = 0,42$ ,  $l_Y = 35$  м (корреляционный масштаб  $l_Y$  равен 1/3 радиуса вариограммы). При построении графиков  $C(x)$  (расчетные моменты времени 10, 500 и 5 000 сут) использовались две функциональные зависимости  $\delta_L(x)$ : линейная (6) и линейная асимптотическая (7) (Рис. 4). Расчеты дополнены  $\delta_L = \text{const}$ :  $\delta_L = \sigma_Y^2 l_Y = 14,7$  м – эта величина является асимптотическим значением в зависимости (7). Структура параметра  $a$  в (6) и (7) была определена в терминах стохастической модели изотропной среды для асимптотики Г. Дагана (3)  $a = \alpha \sigma_Y^2 = 0,224$  (при  $\alpha = 8/15$ ). Для линейной асимптотической модели параметр  $x_0$  был определен исходя из равенства значений дисперсивностей на пересечении двух участков графика  $\delta_L(x)$ :  $\alpha x_0 = \delta_L^* = \sigma_Y^2 l_Y$  ( $a = \alpha \sigma_Y^2$ ), откуда  $x_0 = l_Y / \alpha = 65,63$  м.

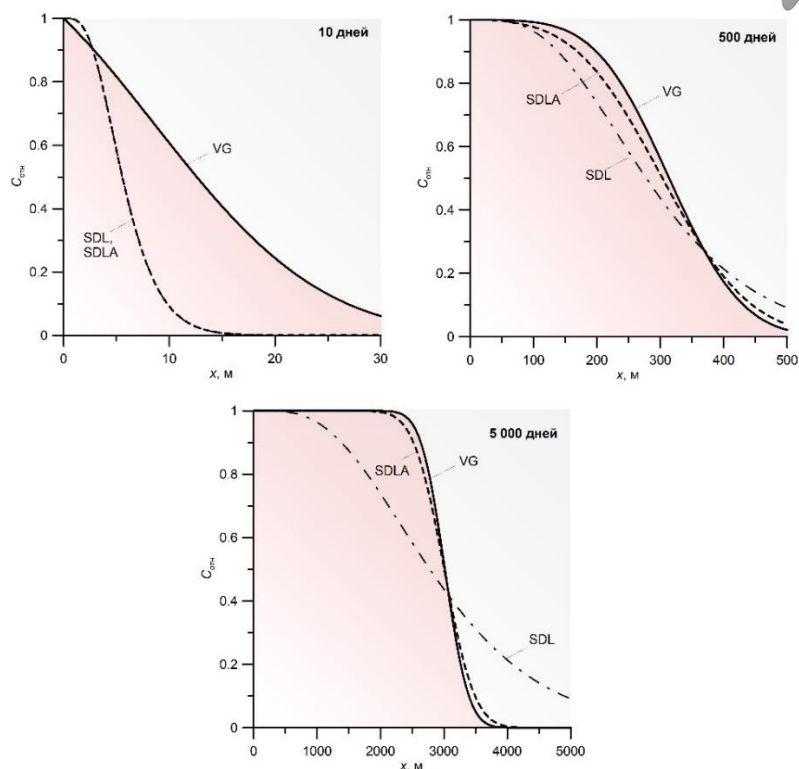


Рис. 4 Влияние вида функциональной зависимости  $\delta(x)$  на характер концентрационного фронта вещества в одномерном потоке: штрихпунктирная кривая – линейная функция SDL (6), штриховая кривая – линейная асимптотическая SDLA (7), сплошная кривая – решение с постоянными коэффициентами дисперсивности.

Как видно из графиков, на начальных этапах миграции линейная и линейная асимптотическая модели дают весьма близкие результаты, которые, однако, сильно отличаются от расчетов с использованием решения с постоянным асимптотическим коэффициентом дисперсивности  $\delta_L = \sigma_Y^2 l_Y$ . Со временем происходит сближение кривых распределения с этим решением. На больших временах фронт загрязнения для линейной модели выглядит значительно более размытым, нежели при использовании моделей с постоянным коэффициентом дисперсивности или линейных моделей с асимптотикой.

### Заключение

При пространственных масштабах переноса загрязнения в аллювиальном водоносном горизонте долины р. Дунай на изучаемом участке строительства Пакш II, измеряемых сотнями метров и временем до нескольких лет, рассеяние вещества контролируется масштабными эффектами – зависимостью коэффициента дисперсии от расстояния или времени нахождения загрязнения в подземных водах. Анализ вариограммы коэффициента фильтрации позволяет предположить, что предпочтительной для миграционных расчетов должна быть линейная модель для коэффициента  $\delta_L(x)$  (6). Ее близость с линейной асимптотической моделью (7)

объясняется сопоставимостью значений пороговой характеристики  $x_0$  с длиной фронта переноса за рассмотренный промежуток времени (около трех лет).

Наконец, зависимости (7) и (8) при коэффициентах  $\sigma_Y^2$  и  $l_Y$ , найденных при помощи стохастического анализа опытных откачек на площадке АЭС Пакш II, не противоречат общему тренду опытного материала, обобщенного в статье [9] (Рис. 5).

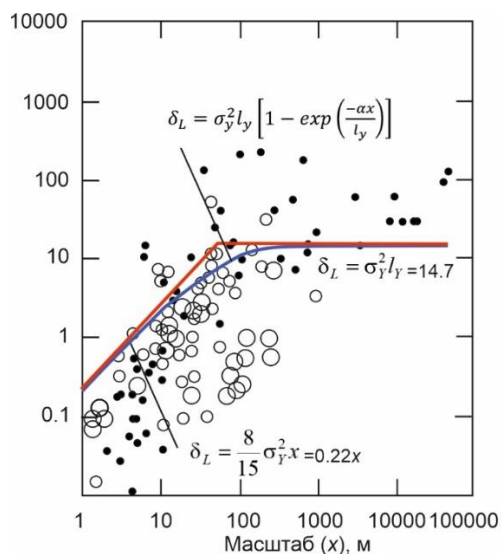


Рис. 5 Влияние масштаба миграционного процесса на эффективное значение продольной дисперсивности,  $\delta_L$  для неконсолидированных разностей пород [9] (Размер кружков пропорционален надежности определений  $\delta_L$ ).

Однако, как видно, в аллювиальном горизонте на участке Пакш II следует ожидать более высокую степень рассеяния загрязняющего вещества по сравнению с величиной, рассчитанной по «среднестатистическим» данным.

### Список литературы

1. Синдаловский Л.Н. Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT / СПб.: Изд-во Наука, 2021. 891 с.
2. Basha, H.A., El-Habel, F.S. 1993. Analytical solution of one-dimensional time-dependent transport equation. Water Resources Research, Vol. 29, No. 9, p. 3209-3214.
3. Dagan, G. Flow and Transport in Porous Formations. Berlin, N. Y. Springer-Verlag Heidelberg, 1989. 465 p.
4. Dagan, G. Theory of solute transport by groundwater // Ann. Rev. Fluid Mechanic. 1987. Vol. 19. P. 183–215.
5. Gelhar, L.W. Stochastic subsurface hydrology. Prentice-Hall Inc, Englewood Clift, New Jersey. USA, 1993. 390 p.
6. Gelhar, L.W., Axness C.L. Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers // Water Res. Res. 1983. Vol. 19. N 1. P. 161–180.

7. Neuman, Sh. P., Zhang, Y.K. A quasi-linear theory of Non-Fickian and Fickian subsurface dispersion // Water Res. Res. 1990. Vol. 26. N 5. P. 887–902.
8. Pickens, J.F., Grisak, G.E., 1981b. Modeling of scale-dependent dispersion in hydrogeologic systems. Water Resour. Res. 17 (6), 1701–1711.
9. Schulze-Makuch, D. 2005. Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior, Ground Water, 43(3), 443–456, doi:10.1111/j.1745-6584.2005.0051.x.
10. Zech, A., Attinger, S., Cvetkovic, V., Dagan, G., Dietrich, P., Fiori, A., Rubin, Y., Teutsch, G. 2015. Is unique scaling of aquifer macrodispersivity supported by field data?, Water Resources.