

## 06.01.00 Агронмия

УДК 502/504: 631.62

**Н.П. КАРПЕНКО, И.М. ЛОМАКИН**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва**УЧЁТ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОРОД ЗОНЫ АЭРАЦИИ  
В ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТАХ ДРЕНИРОВАНИЯ  
НА МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ**

*Основная цель исследований состоит в изучении и учете влияния неоднородности, гетерогенности и анизотропии пород зоны аэрации в геофильтрационных расчетах, которые необходимы в прогнозах гидродинамической обстановки при работе системы инженерных сооружений. Результаты изучения геологических и мелиоративных объектов показывают, все они практически являются неоднородными (гетерогенными) по тому или иному признаку. Масштабы неоднородности геологических толщ отложений позволяют, согласно существующим представлениям, выделить два её типа: макро- и микронеоднородность. Анализ геологического строения, генетических и литологических особенностей отложений позволил установить важные свойства изучаемых горных пород: вертикальную неоднородность (слоистость) на фоне латеральной изменчивости мощности отдельных слоев и крупности их частиц. Источниками изменчивости отложений являются размер частиц, их форма и ориентировка, геометрия и структура порового пространства, генерирующие микроструктурность. При решении гидрогеолого-мелиоративных задач определяющей является идентификация природной среды и выбранной модели, заключающаяся, прежде всего, в учете фильтрационной неоднородности внутри слоя, что ставится под сомнение правомерность традиционного допущения изотропности природных сред в фильтрационных расчётах. В гидрогеологических прогнозах указанное допущение приводит к ошибочному мнению о степени влияния орошения (осушения) на гидрогеологическую обстановку территорий объектов природообустройства (мелиоративных систем). Упрощенное представление о благоприятных условиях может быть причиной ошибок в назначении сроков ввода дренажа, его параметров, конструкций элементов подпорных сооружений. Учет неоднородности и вертикальной анизотропии пород зоны аэрации в фильтрационных расчетах горизонтальных дрен наиболее полно идентифицирует природную среду при решении гидрогеолого-мелиоративных задач, связанных с вопросами горизонтального дренажа на мелиоративных системах.*

*Неоднородность, анизотропия, поровое пространство, породы зоны аэрации, мелиоративные системы, магистральные каналы, дренирование, дренаж*

**Введение.** Изучение неоднородности, анизотропии и геометрии структуры порового пространства пород зоны аэрации является важным вопросом при решении многих мелиоративно-гидрогеологических задач. Основная цель исследований состоит в изучении и учете влияния неоднородности, гетерогенности и анизотропии пород зоны аэрации в геофильтрационных расчетах,

которые необходимы при прогнозах гидродинамической обстановки в работе системы инженерных сооружений. Научная новизна исследований заключается в разработке предложений по решению задач подпора и дренирования в анизотропной среде и методов учета сопротивления на границе сопряжения потоков с водотоками. Подобная диагностика процесса подпора и его

прогноз необходимы при проектировании инженерных сооружений и анализе режимных наблюдений в период наполнения магистральных каналов, водохранилищ и т.д. Результатом выполненных исследований является изучение и диагностика условий формирования потоков подземных вод вблизи гидрогеологических границ первого рода, для которых предложены формулы для расчета и рассмотрены условия их применения. Положения и результаты, изложенные в статье, научно обоснованы и имеют существенное значение при проектировании инженерных сооружений. Данные исследования могут быть использованы специалистами-гидрогеологами, проектировщиками дренажных, водопонижительных и гидротехнических систем, мелиораторами и др.

В основе проектирования различных объектов природообустройства, в том числе и мелиоративных систем, лежит изучение гидрогеологических условий, связанное с выявлением и картированием показателей различных свойств пород зоны аэрации и водонасыщенных сред. В этом случае наиболее сложной задачей является представление о неоднородности объекта изучения, которое выражается в изменчивости геофильтрационных характеристик данного объекта.

Результаты многочисленных экспериментальных (полевых и лабораторных) и теоретических исследований позволяют считать, что неоднородность (гетерогенность) является имманентным свойством любого геологического объекта, которое возникает одновременно с формированием осадконакопления, и изменяющимся в процессе петрогенеза. Такая изменчивость свойств горных пород связана с историко-геологическими и физико-географическими факторами геолого-гидрогеологической обстановки.

В области гидрогеолого-мелиоративных исследований (мелиорации, водопонижения, дренажа, прогнозов подтопления и т.д.) представляется возможным условно выделить процесс накопления информации о свойствах горных пород, основанный на качественных представлениях и результатах экспериментов, а также учет полученных данных в расчетной схеме инженерной задачи. При этом возникает необходимость схематизации природных условий, т.е. процесса перехода от показателей

свойства в точке к характеристике признака в массиве в соответствии с физической природой объекта. Подобный подход требует определения характера неоднородности, геологического объяснения вариаций изучаемого признака для обоснования выбора его расчетного значения в области флуктуаций [1].

При проектировании инженерных сооружений существуют определенные рекомендации по составу и использованию расчетных схем в решении задач фильтрации, однако в настоящее время методология схематизации практически не разработана. Одной из причин, затрудняющих пространственную экстраполяцию признака при составлении расчетных схем, является недостаточное знание природы неоднородности изучаемых горных пород.

#### **Материал и методы исследований.**

Исследования проводились на мелиоративных объектах Поволжья и Джизакской степи, на которых изучались вопросы фильтрационной неоднородности пород зоны аэрации и водонасыщенной толщи и ее учет в проведении фильтрационных расчетов. Изучаемые объекты представлены отложениями, которые обладают важными структурными и текстурными особенностями, а также геометрией структуры порового пространства. Представления о фильтрационной неоднородности (слоистости, макро- и мезонеоднородности, макропористости и т.д.) отложений пород зоны аэрации и водонасыщенных сред известны, однако их связь с водопроницаемостью недостаточна изучена [2].

В этом плане необходима разработка универсального подхода, который бы учитывал все сложности связей литологических особенностей и фильтрационных свойств или установление общих характерных закономерностей формирования фильтрационных толщ, реализация которого может более обоснованно поставить экспериментальные исследования и повысить качество интерпретации результатов.

Основной интерес для мелиоративно-гидрогеологических расчетов представляют водозаборы подземных вод, дренажные сооружения, магистральные и водозащитные каналы, оказывающие существенное влияние на прилегающие территории, оценка которого является составной частью прогнозных расчетов. В частности, на мелиоративных системах гидрогеоло-

го-мелиоративные исследования связаны с проведением фильтрационных расчетов горизонтального дренажа, характерной особенностью которого является его гидродинамическое несовершенство, обуславливающее деформации потока в вертикальном сечении при входе его в дренаж. При этом рассматриваемая задача связана не только с оценкой пространственной структуры фильтрационного потока, но и с оценкой его геофильтрационных параметров и с учетом неоднородности пород зоны аэрации в расчетах дренирования.

От того, насколько велики ошибки при идентификации выбранной модели и реальной среды, зависят погрешности в проектировании инженерной системы и ее эффективность. В настоящее время наиболее распространенными методами оценки неоднородности толщ горных пород являются морфо-литологический метод, построенный на принципах визуального учета макро- и микроструктур, как единиц гидрогеологического картирования; полевые эксперименты с использованием индикаторных трассеров, позволяющие изучить геометрию и структуру порового пространства зоны аэрации [3, 4].

Очень часто в границах указанных элементов геологическая среда принимается однородной и в подавляющем большинстве случаев – изотропной. Бесспорно, типизация условий зависит от вида задачи и ее инженерных особенностей, однако в расчетных схемах, как правило, почти никогда не отражается микро-неоднородность в любом ее проявлении.

Теоретические аспекты данных вопросов нашли отражение в работах советских и зарубежных исследователей Н.Е. Жуковского, В.В. Ведерникова, А.И. Голованова, П.Я. Полубариновой-Кочиной, В.И. Аравина, С.Н. Нумерова, С.Ф. Аверьянова, Н.Н. Веригина, А.В. Романова, С.К. Абрамова, А.Ж. Муфтахова, В.М. Шестакова, Н.П. Карпенко, Д.А. Манукьяна, В.А. Ионата, И.С. Пашковского, Киркхема, Хоугаудта, Энгелунда и др.

В научной литературе значительное внимание уделено задачам фильтрации в однородных водоносных системах, меньше – в слоистых (с числом слоев до четырех), и небольшое число разработок посвящено математическому описанию подпора и дренирования в пористой микрослоистой (анизотропной) среде. При математическом

описании процессов дренирования допущение изотропности пород зоны аэрации приводит, как правило, к занижению функции напора в характерных сечениях фильтрационных потоков или к ошибочным расчетам дренажа, поэтому при решении задач гидрогеолого-мелиоративного прогнозирования эти характеристики являются определяющими.

В задачах дренирования фильтрационных потоков на мелиоративных системах при обосновании типовых геофильтрационных схем в качестве таксономических единиц целесообразно рассматривать слоистые среды с равномерно чередующимися хорошо и слабопроницаемыми прослоями, хотя привычным в практике гидрогеологических расчетов является замена реального неоднородного массива горных пород моделью однородной среды, которая взаимодействует с проектируемым сооружением как реальный неоднородный массив [5].

Горизонтальные дренажи, как правило, имеют небольшие размеры, поэтому их гидродинамическое несовершенство может учитываться по упрощенной схеме путем введения одного дополнительного сопротивления, величина которого сильно зависит от неоднородности пород зоны аэрации и водоносного пласта. Кроме того, на эту величину влияют положение кривой депрессии вблизи дренажа и размер капиллярной зоны, поскольку они определяют верхнюю границу потока. Принято выделять два вида несовершенства: по степени вскрытия пласта, соответствующей положению дренажа относительно его вертикальных границ и фильтрационной неоднородности или анизотропии; по характеру вскрытия, зависящему от заиливания стенок горной выработки, применяемых материалов и технологии строительства (это несовершенство иногда называют «скин-эффектом») [6].

Некоторые исследователи считают, что при дискретном распределении водопроницаемости в пространстве между дренажами положение уровня грунтовых вод в каждом блоке с коэффициентом фильтрации будет определяться расчетной зависимостью для дренажа в однородном слое. Экспериментально подтверждается, что если изменчивость коэффициентов фильтрации при расчетах дренажа является существенной, то варьирование напоров, наблюдаемое при этом, становится гораздо меньше [7].

**Результаты и обсуждение.** Необходимость совместного рассмотрения вопросов выбора структурной модели или эффективного параметра, размеров зоны влияния эксперимента в согласовании с размерами неоднородности требуют дополнительных исследований на мелиоративном объекте. С целью определения гидрогеологических параметров представляет интерес анализ депрессионных кривых вблизи открытых дрен, водотоков и осушительных каналов, полученных при проведении исследований на мелиоративных объектах. Уравнение поверхности симметричного квазистационарного потока грунтовых вод направленного к дрене (рис. 1) имеет вид [8]:

$$\Delta H_x = \frac{ql}{2T} \left[ f(\bar{x}) + \frac{2L_{nd}}{l} \right], \quad f(\bar{x}) = \frac{x}{l} \left( 1 - 0,5 \frac{x}{l} \right), \quad (1)$$

где  $q$  – половинный расход дрены ( $q = \omega l$ );  $\Delta H_x$  – превышение УГВ в сечении  $x$  над уровнем воды в дрене,  $\bar{x} = \frac{x}{l}$ .

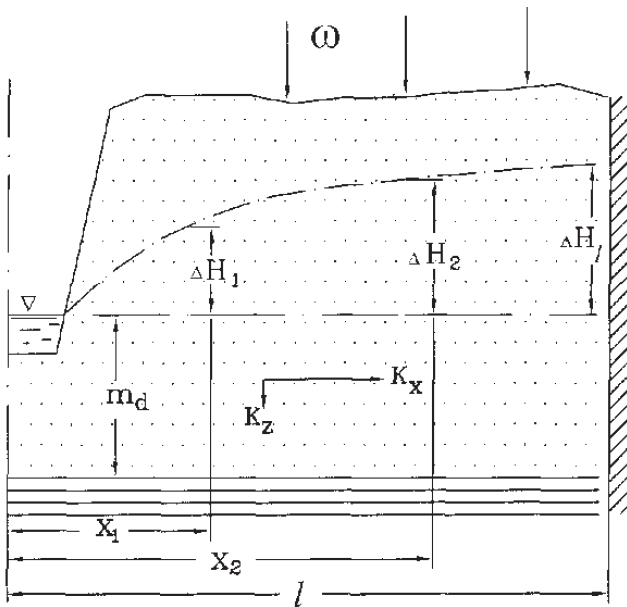


Рис. 1. Схема дренаживания к расчету искомым характеристик однослойной среды

Для расчета искомым характеристик однослойной среды по единовременному замеру строится график в координатах  $\Delta H_x \rightarrow f(\bar{x})$ , угловой коэффициент которого  $c_d = \frac{ql}{2T_x}$  и начальная ордината  $A_d = \frac{qlL_{nd}}{2T_x}$  позволяют определить водопроницаемость и дополнительное фильтрационное сопротивление дрены (рис. 2).

Чтобы найти горизонтальную и вертикальную составляющие водопроницаемости, следует оценить величину эффективной «активной» мощности водоносного пласта под дреной, приняв редуцированный коэффициент  $\alpha = \frac{l}{l + L_{nd}}$ .

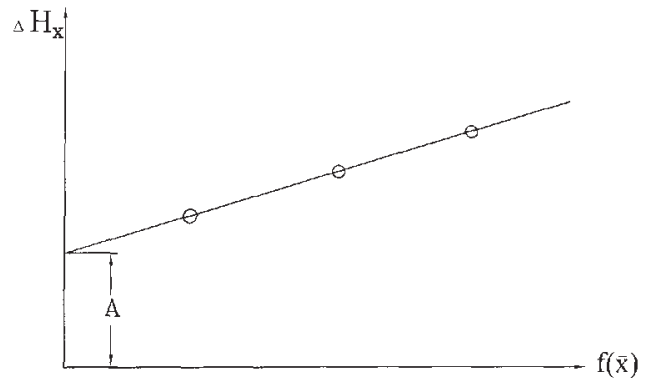


Рис. 2. Схема к расчету параметров по кривой  $\Delta H_x \rightarrow f(x)$

Имея данные о напорах в различных сечениях купола грунтовых вод, можно найти значения параметров водопроницаемости. Для дрены в анизотропном пласте, когда её контур по условию совпадает с некоторой эквипотенциалью, решение для напора в пространстве между совершенными дренами имеет вид [9]:

$$h = h_d + \frac{\omega}{2h_*} \left( \frac{l_c^2 - x^2}{K_x} - \frac{h_d^2 - z^2}{K_z} \right). \quad (2)$$

Зная напоры в двух точках профиля, находим:

$$K_z = \frac{\omega}{2h_*} \cdot \frac{z_2^2 - z_1^2}{h_2 - h_1}, \quad (3)$$

$$K_x = \frac{\omega}{2h_*} \cdot \frac{(l_c^2 - x_1^2)(z_2^2 - z_1^2)}{(z_2^2 - z_1^2)(h_1 - h_d) + (h_d^2 - z_1^2)(h_2 - h_1)}. \quad (4)$$

Приведенные решения можно использовать в зоне  $0 \leq x \leq l^1$ ;  $l^1 = l - (2-3)h_*$ . Для практического применения формул (3) и (4) надо определить значение напора в точке  $(X_2, m)$ , затем в уравнении (4) принять  $X$  и  $m$  вместо  $l_c$  и  $h_d$  соответственно (рис. 3).

Расстояние до фиктивной совершенной дрены находится из уравнения

$$l_c = \sqrt{2h_*(h_0 - h_d) \cdot \left(1 - \frac{\omega}{K_z}\right) \cdot \frac{K_x}{\omega}}, \quad (5)$$

где  $h_0$  – напор на междренье.

Аналогичная процедура может использоваться как аналог в новых условиях, однако решение подобной задачи в лаборатории едва ли возможно. Дополнительно ослож-

нение может вносить плановая неоднородность, причем локализация таких участков предварительно должна оцениваться на основе статистической обработки данных.

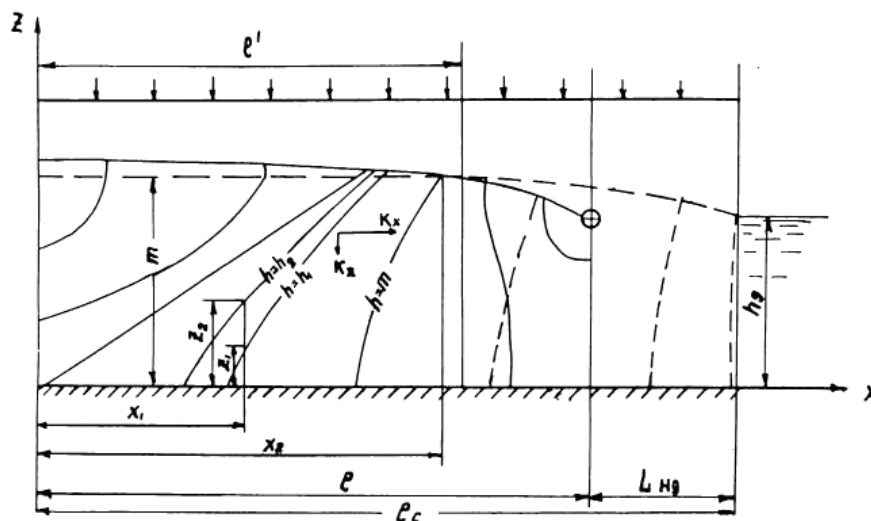


Рис. 3. Схема к расчёту параметров фильтрации по данным о работе несовершенного горизонтального дренажа

### Выводы

Результаты изучения неоднородности пород зоны аэрации, полученные на мелиоративных объектах Поволжья и Джизакской степи, показали, что практически все они являются неоднородными (гетерогенными) по тому или иному признаку. Масштабы неоднородности позволяют, согласно существующим представлениям, выделить два её типа: макро- и микронеоднородность. Анализ геологического строения и литологических особенностей отложений на основе генезиса позволил установить важные качества изучаемых горных пород: вертикальную неоднородность (слоистость) на фоне латеральной изменчивости мощности отдельных слоев и крупности их частиц. Источниками изменчивости в данном случае являются размер частиц, их форма и ориентировка, геометрия и структура порового пространства, генерирующие микроструктуру.

При решении гидрогеолого-мелиоративных задач определяющей задачей является идентификация природной среды и выбранной модели, заключающаяся прежде всего в учете фильтрационной неоднородности внутри слоя, что ставится под сомнение правомерность традиционного допущения изотропности природных сред в фильтрационных расчётах. В гидрогеологических прогнозах указанное до-

пущение приводит к ошибочному мнению о степени влияния орошения (осушения) на гидрогеологическую обстановку территорий объектов природообустройства (мелиоративных систем). Упрощенное представление о благоприятных условиях может быть причиной ошибок в назначении сроков ввода дренажа, его параметров, конструкций элементов подпорных сооружений и т.д.

На основе предпосылок вертикальной микронеоднородности отложений предлагаются методы расчёта подпора и дренирования. Используемые зависимости показывают необходимость более определённого и целенаправленного изучения фильтрационных свойств горных пород зоны аэрации и водонасыщенных сред. Рассмотренные аналитические зависимости для потоков на слабопроницаемом слое для конкретных мелиоративных систем дали возможность скорректировать прогнозы развития гидрогеологических условий. Было установлено, что анизотропия верхнего хорошо проницаемого слоя пород зоны аэрации увеличивает темпы подъёма грунтовых вод под орошаемым массивом, если составляющая водопроницаемости различаются более чем вдвое.

Полученные рекомендации и критерии ориентируют на целевое проведение гидрогеолого-мелиоративных исследований,



повышение их качества и технико-экономических характеристик строительства, а также позволят оценивать экологическую надёжность проектных решений на объектах природообустройства.

#### Библиографический список

1. Жабин В.Ф., Карпенко Н.П., Ломакин И.М. Формирование гетерогенной среды и регулирование режима грунтовых вод в задачах природообустройства: Монография. – М.: МГУП. – 2013. – 208 с.
2. Жабин В.Ф., Карпенко Н.П., Ломакин И.М. Фильтрационная расчетная схематизация тонкослоистых сред и надежность инженерных решений. // Природообустройство. – 2013. – № 2. – С. 65-71.
3. Жабин В.Ф., Карпенко Н.П., Ломакин И.М. Особенности определения гидрогеологических характеристик анизотропных сред для расчета дренажа // Природообустройство. – 2010. – № 3. – С. 80-87.
4. Карпенко Н.П. Исследование структуры порового пространства почв и пород зоны аэрации // Вестник РАСХН. – 2006. – № 2. – С. 61-63.
5. Рац М.В. Структурные модели в инженерной геологии. – М.: Наука. – 1973. – 213 с.
6. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика: Учебник. – М.: КДУ, 2009. – 334 с.
7. Голованов А.И., Сурикова Т.И., Сухарев Ю.И. Основы природообустройства. – М.: Колос, 2001. – 264 с.
8. Жабин В.Ф., Манукьян Д.А., Карпенко Н.П. Особенности и учет вертикальной анизотропии водоносных отложений в фильтрационных расчетах и задачах подпора // Вестник РАСХН. – 2011. – № 3. – С. 5-8.
9. Манукьян Д.А., Жабин В.Ф. Гидрогеоэкологические проблемы в задачах природообустройства: Монография. – М.: МГУП, 2006. – 194 с.

Материал поступил в редакцию 30.05.2016 г.

#### Сведения об авторах

**Карпенко Нина Петровна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока», ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 19; e-mail: nrcarpenko@yandex.ru

**Ломакин Иван Михайлович**, кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 19; тел.: 8-499-976-22-27.

**N.P. KARPENKO, I.M. LOMAKIN**

Federal state budget educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev»

## CONSIDERATION OF ROCKS HETEROGENEITY OF THE AERATION ZONE IN FILTRATION CALCULATIONS OF DRAINAGE ON RECLAMATION SYSTEMS

*The main purpose of investigations is studying and consideration of the influence of heterogeneity and anisotropy of rocks of the aeration zone in geo filtration calculations which are necessary in forecasts of the hydrodynamic environment under operation of engineering facilities. The results of studying geological and reclamation objects show that all of them are practically heterogeneous on one or another character. The scales of the heterogeneity of geological thicknesses of sediments allow, according to the existing concepts, singling out two its types: macro- and micro heterogeneity. The analysis of geological texture, genetic and lithologic features of sediments allowed establishing important properties of the studied rocks: vertical heterogeneity (lamination) on the background of lateral changeability of the power of some layers and coarse sizes of their particles. The sources of the sedimentation changeability is the size of particles, their form and orientation, geometry and texture of pore space generating micro lamination. When solving hydro geo reclamation tasks, the decisive one is identification of the natural environment and chosen model consisting, first of all, of studying the filtration heterogeneity inside the layer which doubts the traditional assumption of the isotropy of natural media in filtration calculations. In hydrological forecasts the indicated assumption leads to the mistakable opinion about the degree of the influence of irrigation (drainage) on the hydrological environment of territories of environmental engineering objects (reclamation systems). The simplified concept on favorable conditions*

*can be a cause of mistakes in assigning the terms of drainage introduction, its parameters, design of elements of supporting structures. Taking into account heterogeneity and vertical anisotropy of rocks of the aeration zone in filtration calculations of horizontal drains identifies the natural medium fullier when solving hydrogeo-reclamation tasks connected with the problems of horizontal drainage on reclamation systems.*

*Heterogeneity, anisotropy, pore space, rocks of the aeration zone, land reclamation systems, main canals, drainage.*

### References

1. Zhabin V.F., Karpenko N.P., Lomakin I.M. Formirovanie geterogennoj sredy I regulirovanie rezhima gruntovyh vod v zadachah prirodoobustrojstva: Monografiya. – M.: MGUP. – 2013. – 208 s.
2. Zhabin V.F., Karpenko N.P., Lomakin I.M. Filjtratsionnaya raschetnaya skematizatsiya tinlosloistyh sred i nadezhnostj inzhenernyh reshenij. // Prirodoobustrojstvo. – 2013. – № 2. – S. 65-71.
3. Zhabin V.F., Karpenko N.P., Lomakin I.M. Osobennosti opredeleniya gidrogeologicheskikh harakteristik anisotropnyh sred dlya rascheta drenazha // Prirodoobustrojstvo. – 2010. – № 3. – S. 80-87.
4. Karpenko N.P. Issledovanie struktury porovogo prostranstva pochv I porod zony aeratsii // Vestnik RASHN. – 2006. – № 2. – S. 61-63.
5. Rats M.V. Strukturnye modeli v inzhenernoj geologii. – M.: Nauka. – 1973. – 213 s.
6. Shestakov V.M. Gidrogeodinamika: Uchebnik. – M.: KDU, 2009. – 334 s.
7. Golovanov A.I., Surikova T.I., Sukharev Yu.I. Osnovy prirodoobustrojstva. – M.: Kolos, 2001. – 264 s.
8. Zhabin V.F., Manukjyan D.A., Karpenko N.P. Osobennosti i uchet vertikalnoj anizotropii vodonosnyh otlozhenij v filjtratsionnyh raschetah I zadachah podpora // Vestnik RASHN. – 2011. – № 3. – S. 5-8.
9. Manukjyan D.A., Zhabin V.F. Gidrogeoeologicheskie problem v zadachah prirodoobustrojstva: Monografiya. – M.: MGUP, 2006. – 194 s.

The material was received at the editorial office  
30.05.2016

### Information about the authors

**Karpenko Nina Petrovna**, doctor of technical sciences, professor of the chair «Hydrology, hydrogeology and flow regulation», FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d. 19; e-mail: npkarpenko@yandex.ru

**Lomakin Ivan Mikhailovich**, candidate of geological-mineralogical sciences, professor of the chair of hydrology, hydrogeology and flow regulation», FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d. 19; tel.: 8-499-976-22-27.