

УДК 551.79

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОТБОРА  
ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ОБЪЕМОВ  
ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД БЕЛАРУСИ**

**Костюкович П.Н.**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск Республика Беларусь*

Исследуются особенности критериального подхода к оценке эксплуатационных запасов пресных подземных вод Беларуси; разработано два гидрогеологических критерия ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ) решения этой проблемы. Приводятся числовые функции геохимической ступени минерально-лечебных вод, характеризующие рост их макрокомпонентов ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$   $\text{SO}_4^{2-}$ ) с глубиной.

The article investigates the characteristics of criterion approach to the assessment of commercial reserves of fresh groundwater Belarus. The author developed two hydrogeological criteria ( $\alpha_1$  and  $\alpha_2$ ) solutions to the problem. The article contains the numeric functions of the geochemical stage of mineral-medicinal waters that characterize the growth of macrocomponents ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$   $\text{SO}_4^{2-}$ ) with depth.

Подземная гидросфера осадочного чехла Беларуси содержит три различных по интенсивности зоны вертикального водообмена. Верхняя зона (активного или максимального) водообмена имеет прямую гидравлическую связь с поверхностными, в частности речными, водами и не может существовать без них, в одни сезоны года восполняя реки и озера, в другие – питаясь ими [1, 2, 3, 7]. В этих

условиях единовременный отбор из верхней зоны объемов пресных подземных вод (ППВ), равных или превышающих величины инфильтрационного питания осадочного чехла  $W_i = 76,6$  мм/год, неизбежно приведет к таким изменениям гидрогеологических условий, которые заведомо недопустимы и пока не подвластны водобалансовым прогнозам, формируя *области геоэкологических рисков* [3, 5]. В *планетарной геоэкологии* эти риски еще не получили должного развития и фактически находятся в начальной стадии познания (прежде всего при оценке предельных или максимальных эксплуатационных запасов ППВ, предназначенных для единовременного отбора из зоны активного водообмена [1, 5]). Поэтому представляет интерес рассмотрение данной проблемы с позиции гидрогеологических критериев *теории предельно допустимых геоэкологических изменений (ПДГИ)* геологической среды и ее фаз [1, 3].

Поскольку площадь территории Беларуси составляет  $S_{BY} = 2,076 \cdot 10^5$  км<sup>2</sup>, то между различными размерностями единичных величин естественных ресурсов  $Q_R$  и эксплуатационных запасов  $Q_Z$  ППВ Беларуси имеют место равенства:

$$1 \text{ км}^3/\text{год} = 2,7397 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{сут} = 4,817 \text{ мм/год} = 31,71 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (1)$$

$$1 \text{ мм/год} = 0,2076 \text{ км}^3/\text{год} = 0,568767 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{сут} = 6,583 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (2)$$

$$1 \text{ млн м}^3/\text{сут} = 0,365 \text{ км}^3/\text{год} = 1,7581888 \text{ мм/год} = 11,574 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3)$$

где мм/год – размерность слоя инфильтрационного питания  $W_i$ , ежегодно поступающего в подземную гидросферу и создающего в ней соответствующий водный, урвенный и солевой балансы в зонах водообмена – с одной стороны, и глубинные поэтажные транзитные потоки, играющие важную роль в межбассейновом перераспределении подземных ресурсов – с другой [3, 6, 7]. Величина инфильтрационного питания  $W_i$  измеряется у поверхности земли на глубине 1...5 м лизиметрическими установками и является функцией водопроницаемости грунтов, интенсивности осадков, глубины установки лизиметров, положения УГВ и других факторов; относительно среднегодовой величины атмосферных осадков в Беларуси  $W_0 = 650$  мм/год на долю  $W_i$ , т.е. «подземной составляющей»  $W_0$ , в настоящий период приходится по различным оценкам [6, 7] около 11,78 %.

С учетом равенств (1–3) подсчитанные БелНИГРИ [7] естественные ресурсы  $Q_R$  и прогнозные эксплуатационные запасы  $Q_Z$  ППВ Беларуси на фоне среднегодового инфильтрационного питания осадочного чехла  $W_i = 76,6$  мм/год принимают значения:

$$Q_R = 15,9 \text{ км}^3/\text{год} = 43,56 \text{ млн м}^3/\text{сут} = 76,59 \text{ мм/год} = 504,2 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (4)$$

$$Q_Z = 18,09 \text{ км}^3/\text{год} = 49,56 \text{ млн м}^3/\text{сут} = 87,14 \text{ мм/год} = 573,6 \text{ м}^3/\text{с} \quad (5)$$

Сопоставление величин (4) и (5) показывает, что прогнозные эксплуатационные запасы ППВ Беларуси, разрешаемые БелНИГРИ к единовременному отбору из ее недр, на 13,77%, т.е. на

$$\Delta Q_Z = Q_Z - Q_R = 2,19 \text{ км}^3/\text{год} = 6,0 \text{ млн м}^3/\text{сут} = 10,55 \text{ мм/год} = 69,4 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6)$$

превышают естественные ресурсы или среднегодовое инфильтрационное питание  $W_i$  (для обоснования превышения  $Q_Z > Q_R$ , с позиции водного баланса и геоэкологии недопустимого в пределах страны [1, 3, 5], использован наблюдаемый в определенных локальных и временных условиях процесс некоторого увеличения  $W_i$  при понижении УГВ (за счет соответствующего уменьшения поверхностной составляющей  $W_0$ ), т.е. методология оценки предельных запасов ППВ основана на гипотезе, требующей водобалансового обоснования: чем больше воды забирается из зоны активного водообмена Беларуси, тем больше ее туда поступает, в данном случае на величину  $\Delta Q_Z$ , которую также рекомендуется забирать из недр). Гидрогеологические и геоэкологические последствия (прежде всего для меженных расходов рек и уровней подземных вод) такого истощения подземной гидросферы до сих пор не исследуются и, естественно, не прогнозируются [6, 7]. В этой связи назрела необходимость в разработке научной концепции оценки эксплуатационных запасов ППВ, основанной на теории ПДГИ подземной гидросферы.

С данных позиций получим два гидрогеологических критерия для оценки предельно допустимых эксплуатационных запасов ППВ, разрешаемых к единовременному отбору из недр при соответствующем нарушении водного баланса и гидрогеологических условий: один для грунтовых вод, второй – для артезианских вод зоны

активного водообмена. Очевидно, что в зависимости от геологического строения, климатических и гидрогеологических условий, интенсивности и глубины водоотбора, степени гидравлической связи поверхностных и подземных вод и других факторов гидрогеологические критерии могут быть концептуально различными, прежде всего по своему содержанию и зонам водообмена.

Пусть в период меженного расхода реки  $Q_{\min}$ , равного ее подземному питанию, отметки УГВ на водоразделе составляют  $\Delta_V$ , а уреза воды в реке  $\Delta_R$ . Тогда действующий напор

$$\Delta H_1 = \Delta_V - \Delta_R, \quad (7)$$

создаваемый инфильтрационным питанием  $W_i$  и подпором подземных вод (ПВ), залегающих ниже уровня  $\Delta_R$ , обеспечивает подземное питание реки

$$q_{\min} = VF = kiF = k(\Delta H_1/L)h \quad (8)$$

и ее существование. Здесь:  $q_{\min}$  – усредненный расход единичного бокового притока ПВ средней мощностью  $h$  и шириной 1, поступающего в реку в межень;  $F = h \cdot l$  – геометрическая площадь поперечного сечения этого потока;  $L$  – расстояние от водораздела до реки;  $k$  – водопроницаемость пласта.

Если на некоторой глубине  $H_0$  в пределах водосбора реки производится забор ПВ в объемах, равных или превышающих  $W_i$ , то со временем, начиная с глубины перехвата инфильтрационного питания  $H \geq H_0$ , пластовое давление в нижезалегающих водоносных горизонтах становится неустойчивым и падает, что приводит к ослаблению или исчезновению глубинного подпора потокам ПВ, поступающим в реку. Это изменение граничных условий области фильтрации приводит к тому, что «речные» потоки ПВ меняют свое направление и начинают идти не к речным долинам и руслам рек, а вглубь подземной гидросферы на восполнение запасов и пластовых давлений горизонтов, из которых производится отбор ПВ. Поэтому первым гидрогеологическим критерием, регулирующим объемы отбора ПВ зоны активного водообмена, может быть коэффициент перехвата естественного питания подземной гидросферы  $\alpha_1$ , не допускающий или ограничивающий уменьшение меженного расхода главных рек. Физически этот коэффициент может

быть выражен через различные гидрогеологические характеристики, в частности отношением допускаемой срезки (понижения) УГВ на водоразделе  $\Delta S_1$  к существующему здесь среднемноголетнему действующему напору  $\Delta H_1$ :

$$\alpha_1 = (\Delta S_1 / \Delta H_1) \ll 1. \quad (9)$$

Режимные наблюдения за УГВ и меженным расходом рек позволяют установить допустимую величину срезки действующего напора  $\Delta S_{1\max}$ . Тогда максимальное значение коэффициента перехвата естественного питания ПВ, определяющее предельные эксплуатационные запасы ППВ и допустимое с гидрогеологических позиций, составит

$$\alpha_{1\max} = \Delta S_{1\max} / \Delta H_1. \quad (10)$$

Для отыскания гидрогеологического критерия, определяющего допустимые пределы отбора артезианских вод и соответствующие им изменения естественных гидрогеологических условий, воспользуемся отличительными чертами *зоны активного водообмена* подземной гидросферы Беларуси [1, 3, 7]. Эта зона представлена толщей осадочных четвертичных и коренных отложений мощностью 150–350 м и содержит несколько артезианских водоносных горизонтов, перекрытых грунтовыми водами и обладающих единой пьезометрической поверхностью, практически совпадающей с УГВ. Отложения ледникового комплекса залегают на дочетвертичных породах кайнозоя... протерозоя, не имеющих выдержанных региональных водоупоров, и пополняются за счет инфильтрации осадков и поверхностного стока. До глубины 100–150 м зона прорезается мощными мегаложбинами – подземными «реками», в плане дублирующими речные долины; мегаложбины заполнены высокопроницаемыми флювиогляциальными отложениями и содержат потоки грунтовых вод, сопоставимые в межень с речными и совпадающие с ними по направлению движения [1, 3].

Артезианские горизонты четвертичной толщи разделены моренами, которые повсеместно размыты и характеризуются наличием обширных литологических «окон».

Анализ влияния глубин залегания пресных ( $M \leq 1$  г/л) и минерально-лечебных ( $1 < M \leq 30$  г/л) вод Республики Беларусь на их

общую минерализацию  $M$  показывает, что мощность зоны активного водообмена  $H_{AB}$ , м в центральных регионах Беларуси подчиняется зависимости:  $H_{AB} = \Delta_{ПЗ} + (95 \dots 105)$ , м или в среднем  $H_{AB} = \Delta_{ПЗ} + 100$ , м. Здесь:  $\Delta_{ПЗ}$  — абсолютная отметка поверхности земли, м;  $-95 \dots -105$  м — диапазон колебания абсолютных отметок «подошвы» (нижней границы) зоны активного водообмена (эту границу в первом приближении (для средней отметки  $-100$  м) можно принимать за «кровлю» зоны замедленного водообмена с ее минерально-лечебными водами). В этой зоне общая минерализация минерально-лечебных вод закономерно возрастает с глубиной:  $M(H^*) = 0,1H^*$ , г/л, где  $H^*$ , м — глубина, отсчитываемая от «кровли» зоны замедленного водообмена, т.е. от отметки  $-100$  м.

Из данной закономерности следует, что для минерально-лечебных вод зоны замедленного водообмена характерна следующая *геохимическая ступень*: общая минерализация минерально-лечебных вод Беларуси возрастает на 1 г/л через каждые 10 м пройденной глубины.

В соответствии с этой закономерностью ведут себя и главные макрокомпоненты минерально-лечебных вод (г/л):  $Cl = 0,05H^*$ ;  $SO_4^{2-} = 0,01H^*$ ;  $Na^+ = 0,03H^*$ ;  $Ca^{2+} = 0,005H^*$ ;  $Mg^{2+} = 0,0015H^*$ .

В этих условиях отбор артезианских вод в объемах, соответствующих прогнозным эксплуатационным запасам [7], приведет к развитию в зоне *сложного межпластового перетекания (СМП)*, способного достичь 60...90 и более % суммарной производительности водозаборов [2, стр. 177, 246]. Такое перетекание порождается гидродинамическим несовершенством разделяющих водоупорных слоев и охватывает целый комплекс смежных водоносных горизонтов, воды которых в разное время начинают двигаться в сторону возмущенного пласта ( $m_0, H_0$ ) как сверху из вышележающих водоносных горизонтов ( $m_1, m_2, \dots; H_1, H_2, \dots$ ) — *верхнее перетекание*, так и снизу из нижележающих водоносных горизонтов ( $m_1', m_2' \dots H_1', H_2' \dots$ ) — *нижнее перетекание*. Здесь  $m, H$  — соответственно мощности и избыточные напоры (до перетекания) возмущенного и смежных пластов.

Методология оценки суммарного перетекания  $\Delta Q_{\text{СУМ}}$ , поступающего из смежных пластов в возмущенный ( $m_0, H_0$ ), может базироваться как на дифференциальном (с оценкой начального градиента напора  $i_0$ , параметров перетекания и других характеристик водо-

упоров), так и на интегральном (с оценкой расходов в возмущенном и смежных пластах по их депрессионным воронкам) подходах. Опыт показывает [2], что наиболее достоверными и экономичными являются интегральные методологии, в основе которых лежат две концепции: расчет перетекания *методом депрессионных воронок*, формирующихся в пластах, вовлеченных в *СМП*, и оценка перетекания

$$\Delta Q_{\text{СУМ}} = \sqrt{(\lambda - 2) \Phi} \quad (11)$$

по коэффициенту водообмена

$$\lambda = 2(1 - i_D/2i) = 2(1 - T/T_D), \quad (12)$$

определяемого по сопоставлению угловых коэффициентов  $i = Q/4\pi T$  и  $i_D = Q/2\pi T_D$  графиков соответственно временного  $S_{rt} = f(\ln t)$  и площадного  $S_{rt} = f(\ln r)$  прослеживания понижений уровня  $S_{rt}$  в наблюдательных скважинах  $r$ , заложенных в возмущенном пласте  $(m_0, H_0)$ , где при наличии подтока вод из смежных пластов  $\lambda \neq 0$  и формируется поток переменной массы, возрастающей по пути движения. Если пласт  $(m_0, H_0)$  абсолютно изолирован, то в нем движется поток постоянной массы и имеют место равенства [2, 4]:

$$i_D = 2i; \quad T_D = T; \quad \lambda = 0; \quad \Delta Q_{\text{СУМ}} = 0. \quad (13)$$

При наличии опытной кустовой откачки с двумя и более наблюдательными скважинами  $(r_1, r_2, r_3, \dots)$  коэффициент водообмена  $\lambda$  легко рассчитать по зависимости [2, с. 162]

$$\lambda = \frac{\ln a_{r2} - \ln a_{r1}}{\ln r_2 - \ln r_1}, \quad (14)$$

где  $\ln a_r = S_{rt}/i - \ln(2,25t/r^2)$  — (15)

коэффициент пьезопроводности пласта в точке  $r$ .

В (11)  $Q$  – суммарная производительность водозабора.

При отсутствии *теории регулирования СМП* и стремлении осуществить отбор прогнозных эксплуатационных запасов ППВ верхнее перетекание может распространиться до грунтовых потоков, питающих реки, а нижнее – до минерально-лечебных вод *зоны замедленного водообмена*. Поэтому гидрогеологические критерии от-

бора артезианских вод должны следовать из теории регулирования *СМП* и эффективно ограничивать развитие как верхнего, так и нижнего перетекания. Очевидно, во всех случаях вторым гидрогеологическим критерием, охраняющим природное состояние подземной гидросферы Беларуси, может быть коэффициент

$$\alpha_2 = \Delta Q_{\text{СУМ}}/Q = \lambda/(\lambda - 2), \quad (16)$$

численно равный предельно допустимой степени развития *СМП* в данных гидрогеологических условиях.

## Литература

1. Богомолов, Ю.Г. Геоэкологические критерии оценки эксплуатационных запасов пресных подземных вод / Ю.Г. Богомолов, П.Н. Костюкович // Ресурсы подземных вод: Современные проблемы изучения и использования : материалы международной конф. Москва, 13-14 мая 2010 г. – М. : МАКС Пресс, 2010. – С. 407–412.
2. Костюкович, П.Н. Гидрогеологические основы вертикального дренажа / П.Н. Костюкович. – Минск : Наука и техника, 1979. – 288 с.
3. Костюкович, П.Н. Гидрогеологические критерии захоронения вредных веществ в недрах Беларуси / П.Н. Костюкович // Проблемы водных ресурсов, геотермии и геоэкологии : материалы междунар. научной конф., т. 1. – Минск : ИГиГ НАН Беларуси, 2005. – С. 118–121.
4. Костюкович, П.Н. Идеи академика Г.В. Богомолова в решениях проблем динамики подземных вод / П.Н. Костюкович // Технологии нефти и газа. – 2009. – № 4 (63). – С. 29–40.
5. Костюкович, П.Н. Мониторинг и геоэкологические проблемы подземной гидросферы Беларуси / П.Н. Костюкович, И.П. Крошнер // Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем : труды международной научной конференции, Москва, МГУ. – М. : МГУ, 2007. – С.197–198.
6. Основы геологии Беларуси. – Минск : Ин-т геолог. наук НАН Беларуси, 2004. – 392 с.
7. Полезные ископаемые Беларуси: к 75-летию БелНИГРИ. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2002. – 528 с.