

УДК 624.131.+551.79

ВОДОБАЛАНСОВАЯ ТЕОРИЯ ПОДЗЕМНОГО СТОКА ЗОНЫ АКТИВНОГО ВОДООБМЕНА БЕЛАРУСИ

Костюкович П.Н.

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

Инфильтрационное питание подземных вод (ПВ) Беларуси составляет около $16 \text{ км}^3/\text{год}$, что создает в подземной гидросфере оптимальный расходный, уроченный и солевой балансы. Однако ряд институтов страны предельные эксплуатационные запасы пресных ПВ Беларуси, разрешаемых к единовременному отбору из ее недр, принимают равным также $16 \text{ км}^3/\text{год}$ и даже $18 \text{ км}^3/\text{год}$. При этом никаких прогнозов геоэкологических последствий такого водоотбора не приводится. Выполненный анализ проблемы позволяет найти оптимальные величины объемов пресных ПВ, которые можно забирать из подземной гидросферы в соответствии с геоэкологическими критериями.

This article performs an analysis of the problem of optimal values of volumes of fresh water that can be extracted from the underground hydrosphere according the geo-environmental criteria. Infiltration of groundwater in Belarus is about $16 \text{ км}^3/\text{year}$, while in the underground hydrosphere provides an optimal balance of expendable and salt. However, a number of institutions in the country are allowed to carry out the selection of operational reserves of fresh water in Belarus equal to as $16 \text{ км}^3/\text{year}$ and even 18 км^3 . However, no predictions of geo-ecological consequences of the water withdrawal is not given.

Внедрение техногенеза в подземную гидросферу требует создания соответствующих теорий и методологий этого воздействия, включающих прежде всего комплекс *предельно допустимых геоэкологических изменений* (ПДГИ) геологической среды [2, 3, 7]. Метод, определяющей количественное соотношение между параметрами среды до и после (или в период) техногенеза, могут служить при оценке эксплуатационных запасов ПВ такие гидрогеологические показатели, как глубины залегания УГВ и пьезометрических поверхностей, подземные составляющие речного стока, интенсивность и направленность перетекания ПВ, гидрохимия водоносных горизонтов, меженные расходы рек и др. [7]. Отсюда следует, что *прогноз ПДГИ подземной гидросферы должен стать важнейшей частью отчетов по оценке эксплуатационных запасов ПВ.*

Значимость этого положения покажем на примере оценки естественных ресурсов и эксплуатационных запасов пресных подземных вод (ППВ) Беларуси, где речные долины, как правило, «сопровождаются» подземными прареками – погребенными водонасыщенными мегаложбинами (ледниковыми палеоврезами) глубиной 100–150 м, многие из которых заполнены высокопроницаемыми флювиогляциальными отложениями; по направлению движения потоки подземных вод мегаложбин совпадают с речными, по расходу в межень сопоставимы с ними, но по своему гидрографу существенно отличаются от рек, не обладая «пиками» половодий. Для этой ситуации *естественные ресурсы* ППВ Беларуси оценены БелНИГРИ в $Q_R = 15,9 \text{ км}^3/\text{год}$, а *прогнозные эксплуатационные запасы* в $Q_z = 18,09 \text{ км}^3/\text{год}$, т.е. на 14 % выше естественных ресурсов [8, 9]. Анализ карт площадного распространения этих ресурсов [9] показал, что имеет место их «закономерное» уменьшение по радиус-векторам «Минск – границы страны», т.е. в направлении от истоков к устьям фильтрационных потоков (рис. 1).

Некорректность таких оценок ресурсов ППВ следует из общеизвестного факта, что при наличии мощного инфильтрационного питания, равного 90–110 мм/год, формируются потоки ПВ переменной массы, у которых расходы не уменьшаются, а возрастают по пути их движения (рис. 2) [1,4].

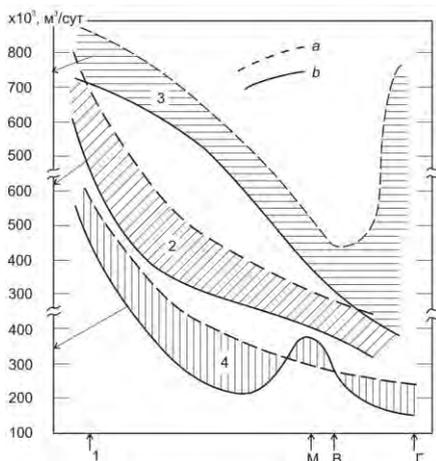


Рис. 1. Примеры «закономерного» уменьшения *прогнозных эксплуатационных запасов (а) и естественных ресурсов (б)* ППВ Беларуси в радиальном направлении Минск (1) → границы Беларуси; 2 → Минск – Могилев (М); 3 → Минск – Витебск (В); 4 → Минск – Гомель (Г); размерность запасов и ресурсов ПВ по БелНИГРИ [9]

Вторым упущением методологии оценки ресурсов ППВ Беларуси, принятой БелНИГРИ, является отсутствие теоретических расчетов ПДГИ для предельной задачи, создающей максимально критическое положение в подземной гидросфере, – для условий одновременного использования эксплуатационных ресурсов в количестве $18,09 \text{ км}^3/\text{год}$, т.е. отсутствие прогнозов геоэкологических последствий отбора из зоны активного водообмена таких объемов пресных вод. Наши оценки показывают, что в рамках ПДГИ и, в частности, при условии постоянства меженных расходов рек и отсутствии дополнительных (относительно мелиоративных) понижений УГВ в речных долинах, эксплуатационные запасы ППВ Беларуси, утверждаемые к одновременному отбору из недр, становятся существенно (как минимум на 50 %) меньше $18 \text{ км}^3/\text{год}$ (этот вывод следует также из современного состояния подземной гидросферы Беларуси, когда при суммарном водоотборе ПВ, равном $1,4\text{--}1,6 \text{ км}^3/\text{год}$, национальный мониторинг фиксирует уменьшение стока малых рек в районах развития депрессионных воронок, созданных водозаборами). Поэтому необходимы дальнейшие исследования по теории определения эксплуатационных запасов ППВ и стандартизации геоэкологических критериев их одновременного отбора.

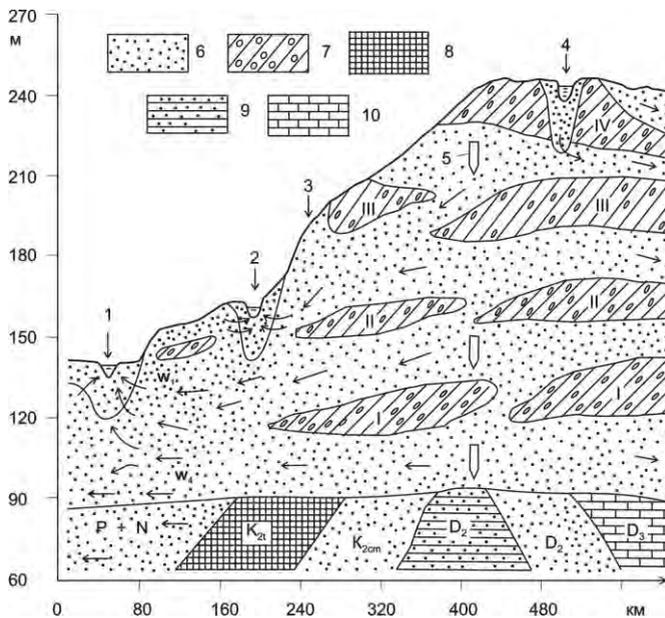


Рис. 2. Схема разделения регионального потока грунтовых вод четвертичной толщи на подземную составляющую речного стока (W_1) и сквозной глубинный поток (W_4) к конечному базису эрозии в створе Полоцк – Минск – Любань – Петриков: 1 – р. Припять; 2 – р. Оресса; 3 – г. Минск; 4 – р. Западная Двина; 5 – подземный водораздел водонапорного комплекса зоны активного водообмена; 6 – пески; 7 – моренные суглинки с валунами; 8 – мел; 9 – мергели, доломиты, песчаники, глины; 10 – известняки и доломитизированные песчаники; морены: I – березинская *glbr*; II – днепровская *gldn*; III – сожская (московская) *gllsz*; IV – поозерская (валдайская) *gllpz*;
 кровля коренных пород условная (по материалам Белорусской гидрогеологической экспедиции)

Анализ данной проблемы показывает, что существующие методологии определения *суммарного подземного стока* и эксплуатационных запасов ППВ содержат ряд упущений принципиального характера. Для их учета в будущих проектах рассмотрим главные гидрогеологические факторы, определяющие достоверность оценок запасов ППВ, а также содержание и цели соответствующих геоэкологических критериев. К этим факторам относятся следующие.

1. Степень и режим гидравлических связей речных вод со всеми потоками подземных вод водосбора, в частности с грунтовыми во-

дами подрусловых отложений и ледниковых мегаложбин, текущих вдоль реки, — так называемыми продольными или *параллельными* подземными потоками (в настоящее время вычлняются из гидрографов рек и затем используются во всех водобалансовых равенствах только *боковые* или *перпендикулярные* речным потоки подземных вод; параллельные руслам рек потоки грунтовых вод, заключенные в подрусловом аллювии и ледниковых пра-реках, вообще не упоминаются, не определяются и поэтому до сих пор не учитываются при оценке суммарного подземного стока и эксплуатационных запасов ППВ).

2. Постоянное взаимодействие подрусловых и боковых потоков грунтовых вод с речными (русловыми), особенно меженными, существующими за счет подземного стока; данный фактор проявляются в том, что централизованный отбор ППВ приводит к существенному понижению их статического уровня на больших территориях и в итоге создает гидродинамические условия для усиления инфильтрации (перетока) поверхностных вод (прежде всего речных и болотных) в подземные; этот процесс можно отнести к главному техногенному фактору, поражающему ряд геоэкологических проблем подземной гидросферы, среди которых недопустимыми являются [2, 3, 7]: 1) рост региональных зон аэрации с соответствующим иссушением территорий и изменением их экологии в «аридную» сторону; 2) уменьшение меженного стока рек; 3) развитие межпластового перетекания ПВ разного химсостава и, как следствие, их гидрохимическое смешение; 4) усиление процессов выщелачивания карбонатных пород и последующее формирование зон карстообразования в геоснованиях и над горными выработками.

3. Принцип эквивалентности (строгого соответствия) геоэкологических критериев гидроэкологическим на разных этапах развития техногенеза; принцип позволяет в первом приближении определить допустимые экстремумы этих критериев; примерами эквивалентности могут служить: 1) соотношения между предельными (максимальными) эксплуатационными запасами ППВ данного водосбора ΔQ_{\max} , допускаемыми к единовременному отбору из подземной гидросферы, к межнным расходам реки до (Q_{\max}) и после (Q_{\min}) этого отбора; соотношения между другими интегральными характеристиками подземного и речного стоков (их модулями, коэффициентами, слоями и т.д.) до и в период отбора ΔQ_{\max} .

4. Принцип регулируемой динамики главных гидрогеологических показателей подземной гидросферы до запланированного водоотбора и в процессе водоотбора на разных его стадиях; такими показателями могут быть: химсостав ПВ возмущенного и смежных по разрезу пластов; направление перетекания ПВ и перепад их уровней *во взаимодействующих горизонтах*; темпы развития и размеры депрессионных воронок в возмущенном и смежных пластах и вытекающие отсюда величины межпластовых перетеканий и привлекаемых ресурсов. Очевидно, прогноз динамики этих показателей должен стать важнейшей задачей гидрогеологических исследований при оценке эксплуатационных запасов ППВ.

5. Принцип интегрального подхода к оценке подземного стока и эксплуатационных запасов ППВ заключается в следующем.

В соответствии с современными методологиями, разработанными Ф.А. Макаренко, Б.И. Куделиным, Б.В. Поляковым и др., расчет подземного стока с водосбора осуществляется *путем расчленения гидрографа реки*, т.е. разделением руслового потока на две составляющие: поверхностную (поверхностный сток) и подземную (подземный сток). Таким образом, в основе методологий лежат две гипотезы: согласно первой *весь подземный сток водосбора поступает только в русло реки и поэтому является некоторой составной частью гидрографа реки*; вторая гипотеза следует из первой и допускает, что для оценки подземного стока достаточно одной измеряемой величины – расхода реки, равного расходу потока, текущего по руслу реки и ее пойме (в половодье) (вычисляется как произведение средней скорости воды в каком-то поперечном створе русла на геометрическую площадь этого створа). Отсюда видно, что в современных методологиях подземный сток рассматривается только с одной позиции – как *некоторая доля руслового потока*; причем, эта доля представляется исключительно как *поперечный* (лево- и правобережный, а также донный) приток-отток грунтовых и артезианских вод, текущих перпендикулярно руслу реки, т.е. перпендикулярно направлению руслового потока.

Такая схематизация подземных потоков, поступающих в речные долины постледниковых равнин, часто не соответствует действительности (прежде всего при наличии подрусловых потоков грунтовых вод, движущихся непосредственно под речными в одну сторону с ними к общей области разгрузки). Дело в том, что в отложениях ледникового комплекса мощностью 100–300 м и более, покрываю-

ших территорию Беларуси, наряду с *поверхностными речными долинами* существует множество прарек или *подземных «рек»* – мощных фильтрационных потоков, направление которых, как и подрусловых, совпадает с речным. Эти потоки грунтовых вод заключены как в подрусловом аллювии, так и во флювиогляциальных отложениях ледниковых мегаложбин, идущих вдоль современных речных и древних (погребенных) ледниковых долин и часто прорезающих четвертичную толщу до коренных пород (рис. 2, 3). Поэтому при оценке суммарного подземного стока с водосборов (W_g) и выработке соответствующих геоэкологических критериев его использования необходимо строго различать два основных потока: *речной*

$$W_R = W_0 + W_1 = W_0 + \alpha W_R, \quad (1)$$

объединяющий весь поверхностный W_0 и часть подземного $W_1 = \alpha W_R$ стоков, и *суммарный подземный*

$$W_g = \sum_{i=1}^n W_i = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + \dots + W_n, \quad (2)$$

состоящий из суммы расходов всех фильтрационных потоков, в частности, подземного поперечного или бокового притока в реку W_1 , равного подземной составляющей гидрографа реки, и трех продольных, текущих параллельно речному к общей области стока: подруслового W_2 , мегаложбинного W_3 и сквозного глубинного W_4 (рис. 4, 5). В итоге общее балансовое равенство для суммарного подземного стока или естественных ресурсов ППВ принимает вид:

$$W_g = \alpha W_R + W_2 + W_3 + W_4 + \dots + W_{n-1} + W_n, \quad (3)$$

где $\alpha = W_1/W_R$ – доля подземного стока в речном стоке; W_{n-1} – расщепленные потоки, формирующие родники и техногенные стоки; W_n – дополнительные глубинные потоки, часто возникающие при интенсивном водоотборе.

Определение суммарного подземного стока W_g методом расчленения гидрографа реки на поверхностную (W_0) и подземную (W_1) составляющие основано на допущении, что этот сток равен притоку ПВ в реку и балансовое равенство имеет вид:

$$W_g^* = W_1 = \alpha W_R. \quad (4)$$

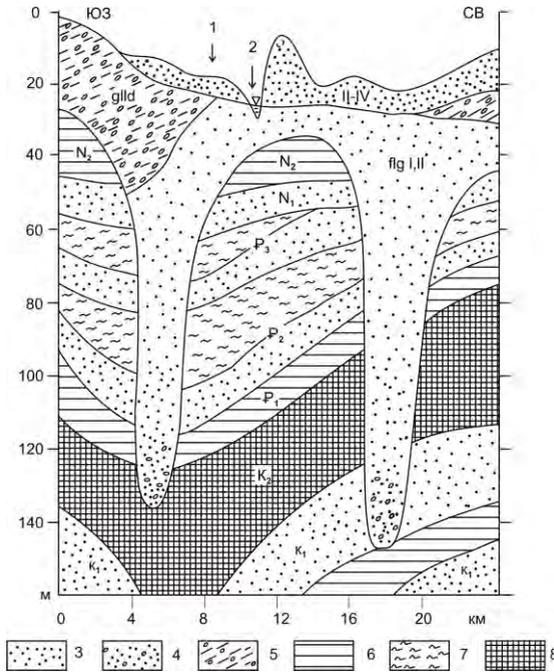


Рис. 3. Ледниковые мегаложбины в районе г. Речица (1), идущие вдоль долины Днестра (2) и содержащие мощные потоки грунтовых вод проднепровского направления; 3 – пески (нижнемеловые, палеогеновые, неогеновые, флювиогляциальные, аллювиальные); 4 – пески флювиогляциальные с гравием; 5 – супесь моренная с валунами; 6 – глины (нижнемеловые, нижнепалеогеновые, средне-неогеновые); 7 – алевриты (средне- и верхнепалеогеновые); 8 – мел писчий верхнемеловой (по материалам Белорусской геофизической экспедиции)

Определяемые по методологиям (4) значения суммарного подземного стока становятся заниженными по сравнению с их истинными величинами по (3) на сумму расходов продольных потоков – подруслового W_2 , мегаложбинного W_3 , глубинного W_4 и др.:

$$\Delta W_g = W_g - W_g^* = W_2 + W_3 + W_4 + \dots + W_n. \quad (5)$$

В отличие от W_R значения расходов продольных потоков W_2 , W_3 и др. не измеряются, а рассчитываются с использованием законов фильтрации, в частности закона Дарси:

$$W_2 = V_2 F_2 = k_2 i_2 F_2;$$

$$W_3 = V_3 F_3 = k_3 i_3 F_3; \dots W_n = V_n F_n, \quad (6)$$

где $V_2 = k_2 i_2$ и $V_3 = k_3 i_3$ – усредненные скорости фильтрации в некоторых поперечных сечениях подруслового и мегаложбинного потоков, геометрическая площадь которых равна соответственно F_2 и F_3 ; i_1 и i_2 – градиенты напора соответственно в подрусловом (здесь они равны уклону реки) и мегаложбинном потоках; k_1 и k_2 – коэффициенты фильтрации подруслового аллювия (k_2) и отложений мегаложбин (k_3). Если значения k_2 относительно стабильны, то k_3 могут существенно изменяться, поскольку мегаложбины периода наступания ледника сложены моренными образованиями, в нижней части разделенными песчаными слоями, а сформированные при отступании ледника – песчаными и флювиогляциальными, у основания которых залегают мощные толщи песка и гравия [5, 6]. Эти закономерности существенно влияют на величины подземного стока W_3 .

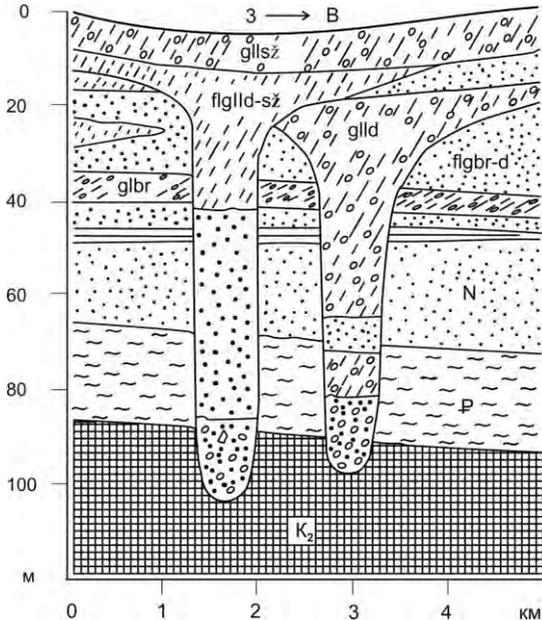


Рис. 4. Погребенные под сожской мореной (*gllsž*) мегаложбины периодов наступания (*gll-dn*) и отступления (*flgll-dn-sž*) днепровского ледника в районе Солигорска (по материалам Белорусской геофизической экспедиции).

Условные обозначения горных пород на рис. 3

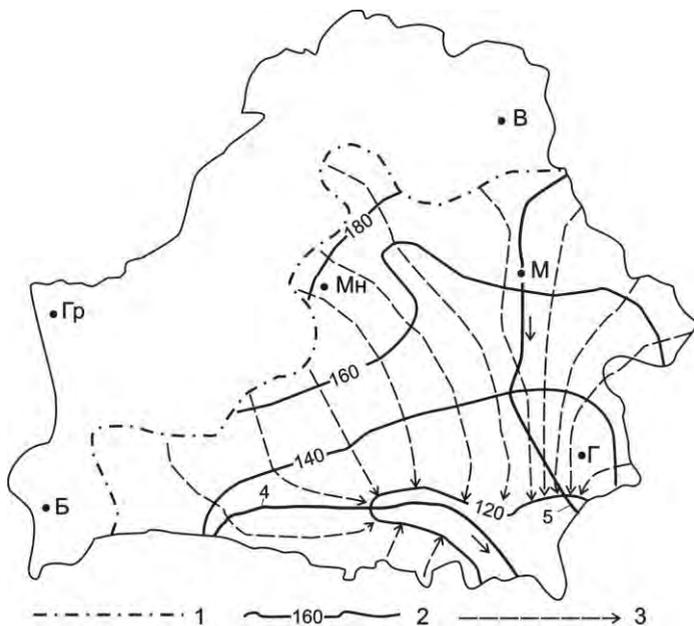


Рис. 5. Наличие перпендикулярных и параллельных рекам фильтрационных потоков артезианских вод зоны активного водообмена в междуречье Припяти (4) и Днепра (5):

- 1 – подземный водораздел водонапорного комплекса зоны активного водообмена;
 2 – гидроизопезы водонапорного комплекса в абс. отм., м; 3 – линии тока;
 города Беларуси: Мн – Минск; Б – Брест; Гр – Гродно; В – Витебск;
 М – Могилев; Г – Гомель;
 по материалам Белорусской гидрогеологической экспедиции

При подсчете расхода W_2 следует иметь в виду, что действительная скорость движения воды в подрусловых потоках закономерно возрастает от V_{\min} у подошвы аллювия до V_{\max} у дна реки, приближаясь к ее донной скорости. Поэтому в соответствующих гидрогеологических условиях продольный подземный сток $W_2 + W_3$ сопоставим с подземным поперечным W_1 или превышает его. Это обстоятельство требует обязательного учета стоков W_2 и W_3 в общем балансе ППВ.

Таким образом, в зависимости от геологических, гидрогеологических и других природных и техногенных факторов суммарный

подземный сток, в соответствии с равенством (3), может состоять из множества потоков грунтовых и артезианских вод, большая часть которых формируется не руслом и долиной данной реки, дренирующей какой-то промежуточный водосбор, а ниже и более глубоко расположенными областями разрузки. В этих условиях, достаточно широко распространенных в осадочном чехле платформ, в подземной гидросфере формируется *гидродинамическая многоэтажность*, при которой на разных глубинах-этажах возникают практически самостоятельные, независимые друг от друга продольные и поперечные потоки ПВ, охватывающие различные водосборные пространства и не поступающие или частично поступающие в реку с изучаемым гидрографом (физически это явление «проскакивания» сквозных потоков под руслами рек можно объяснить *теорией глубинного распределения вертикальных градиентов напора*, порождающих восходящие и нисходящие потоки подземной гидросферы; с этих позиций напорное питание рек артезианскими водами имеет место только в условиях, когда пьезометрические поверхности залегают выше УГВ и формируются восходящие потоки напорных вод). Именно поэтому в одних речных долинах гидроизопезы напорного комплекса зоны активного водообмена Беларуси идут параллельно руслу реки, направляя поток к нему (напр., к Припяти), в других – перпендикулярно ему, что делает поток параллельным реке и не поступающим или частично поступающим в русло (напр., Днепра) (см. рис. 5). Отсюда видно, что определение W_g методами расчленения гидрографа реки в данных гидрогеологических условиях для Припяти в какой-то степени будет правомерным, а для Днепра – совершенно не приемлемым. Это значит, что учет плановой и вертикальной неоднородности потоков ПВ зоны активного водообмена, с высокой достоверностью отражаемой на горизонтальных и «вертикальных» картах гидроизогипс и гидроизопез для различных глубин-этажей, должен стать неотъемлемой частью всех методологий определения W_g .

Существование гидродинамической многоэтажности позволяет также проверить достоверность величины подземного стока W_1 методом *фильтрационных расчетов* потоков грунтовых и артезианских вод, поступающих в русло реки. Для этой цели по створу-поперечнику, к которому приурочен гидрограф реки, на разных глубинах устанавливаются наблюдательные скважины-пьезометры

для измерения вертикальных и горизонтальных градиентов напора, построения гидродинамической сетки и отыскания линий тока. Используя водопроницаемость и мощность водовмещающих отложений, по закону Дарси легко рассчитать расходы потоков, поступающих в русло реки. Очевидно, при наличии гидрогеологической информации эта задача проще решается методами компьютерного моделирования.

Итак, в первом приближении подземный сток с речных водосборов можно разделить на две основные составляющие: сток грунтовых вод и сток артезианских вод. *Сток грунтовых вод* в свою очередь представляет собой сумму двух главных фильтрационных потоков: 1) *перпендикулярных речным* (расходы этих потоков являются частью речных и потому определяются путем расчленения гидрографов рек; в соответствии с современными воззрениями именно эти расходы подземных вод считаются подземным стоком, что с позиции выполненного анализа проблемы является весьма упрощенным и не совсем корректным решением ее); 2) *параллельных речным*; к ним относятся *подрусловые потоки*, заключенные в подрусловом аллювии и «подстилающие» речные; *мегаложбинные*, которые могут быть продолжением подрусловых (см. рис. 3) и самостоятельными (напр., в погребенных ледниковых долинах на склонах и вершинах современных водоразделов) (см. рис. 4); *сквозные глубинные*, часто являющиеся грунтово-напорными, направление их движения подчиняется закономерностям распределения напоров на обширных территориях и является функцией геологического строения и гидрогеологических условий региона, рельефа кровли региональных водоупоров и других факторов.

Артезианский сток зоны активного водообмена по своей структуре также неоднороден и состоит из нескольких потоков, одни из которых под воздействием естественных и техногенных градиентов напора направляются к речным долинам и осушенным болотным массивам, формируя их грунтово-напорное питание; другие обеспечивают перетекание ПВ из смежных пластов в возмущенный, создавая *привлекаемые ресурсы* за счет снижения водообильности смежных и повышения ее у возмущенных пластов (что приводит к коренному изменению расчетных значений гидрогеологических параметров этих горизонтов [1, 4]); третьи уходят к областям разрузки и базисам эрозии своих бассейнов и т.д. В этих условиях представ-

ляемые к утверждению эксплуатационные запасы ППВ должны удовлетворять соответствующим геоэкологическим критериям, прежде всего главному постулату их использования: предельная (максимальная) величина эксплуатационных запасов ППВ, допускаемых геоэкологией к единовременному изъятию из подземной гидросферы, не должна превышать определенной доли водного питания, поступающего в зону активного водообмена и формирующего ее *геоэкологическое состояние*.

В совокупности данные положения можно рассматривать как *водобалансовую теорию суммарного подземного стока и предельных эксплуатационных запасов ППВ зоны активного водообмена*. Концепция, безусловно, должна стать одной из базовых составляющих теории и методологии прогнозирования динамики суммарного подземного стока и предельных водосборов ППВ из подземной гидросферы Беларуси.

Литература

1. Костюкович, П.Н. Гидрогеологические основы вертикального дренажа / П.Н. Костюкович. – Минск : Наука и техника, 1979. – 288 с.
2. Костюкович, П.Н. Гидрогеологические критерии захоронения вредных веществ в недрах Беларуси / П.Н. Костюкович // Проблемы водных ресурсов, геотермии и геоэкологии : материалы междунар. науч. конф., т. 1. – Минск : ИГиГ НАН Беларуси, 2005. – С. 118–121.
3. Костюкович, П.Н. Концепция гидроэкологической мелиорации для заболоченных водосборов Европейского Полесья / П.Н. Костюкович // Европейское Полесье – хозяйственная значимость и экологические риски : материалы международного семинара, г. Пинск. – Минск : Минсктиппроект, 2007. – С. 187–191.
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. Геохронологическая дискретность при формировании морен ледникового комплекса Беларуси / П.Н. Костюкович, И.П. Крошнер // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. науч. трудов Международ. научно-методич.

межвузовского семинара, Могилев, Белорусско-Российский университет, 2005. – С. 220–224

6. Костюкович, П.Н. Положение морен в геохронологической шкале ледникового комплекса антропогена / П.Н. Костюкович, И.П. Крошнер // Геотехника: актуальные теоретические и практические проблемы. – Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2006. – С. 195–200.

7. 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.

8. Основы геологии Беларуси. – Минск : Институт геологич. наук НАН Беларуси, 2004. – 392 с.

9. Полезные ископаемые Беларуси: к 75-летию БелНИГРИ. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2002. – 528 с.