

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 556.14:556.332.62:556.132:6:556.136:556.164

ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
НА ОСНОВЕ ГЕОГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ

С.О. ГРИНЕВСКИЙ¹, Я.В. ИВАНОВА¹, А.О. САФОНОВ²

¹*Московский государственный университет
119991, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы; e-mail: sogrin@geol.msu.ru,*

²*АО «Геоцентр-Москва»
115191, Россия, г. Москва, ул. 2-я Рощинская, д. 10; e-mail: safonov610@gmail.ru*

На территории поисково-оценочных работ для водоснабжения г. Смоленска проведена оценка естественных ресурсов подземных вод (ЕРПВ) средне—верхнефаменского водоносного комплекса на основе гео-гидрологического моделирования формирования инфильтрационного питания, рассматривающего процессы трансформации осадков на поверхности земли и влагопереноса в зоне аэрации. Данный подход позволил оценить суммарные ЕРПВ рассматриваемой территории, а также количественно охарактеризовать неоднородность их условий формирования и распределение в разрезе зоны интенсивного водообмена. Проведенные оценки ЕРПВ подтверждаются результатами геоинфильтрационного моделирования. Рассмотренный подход является альтернативой или дополнением традиционного метода оценки ЕРПВ по межённому стоку рек.

Ключевые слова: ресурсы подземных вод; инфильтрационное питание; водный баланс; моделирование.

AN ASSESSMENT OF THE GROUNDWATER RESOURCES BASED
ON INFILTRATION RECHARGE HYDROGEOLOGICAL MODELING

S.O. GRINEVSKIY¹, Y.V. IVANOVA¹, A.O. SAFONOV²

¹*Lomonosov Moscow State University
119991, Russian Federation, Moscow, Leninskie Gory, GSP-1; e-mail: sogrin@geol.msu.ru,*

²*Joint-stock company «Geocenter-Moskva»
115191, Russia, Moscow, 2 Roshinskaya street, 10; e-mail: safonov610@gmail.ru*

An assessment of the natural groundwater resources (GWR) of Devonian (middle and upper Famennian) aquifer was made in the area of research-assessment works for Smolensk city water supply. It was done on the basis of geohydrological modeling of infiltration groundwater recharge, which includes the surface water balance of precipitation and moisture transverse in the aeration zone. This approach allowed estimation of the total value of natural GWR, as well as the quantitative analysis of the heterogeneity of the conditions of their formation and distribution between upper Quaternary and lower Devonian aquifers (in the zone of the intensive water recharge). The values of the estimated GWR are confirmed by the results of geofiltration groundwater flow modeling. The considered approach is the alternative or addition to the well-known method of GWR estimation, based on the river flow analysis.

Key words: groundwater resources; infiltration groundwater recharge; water balance; groundwater flow modeling.

Изучение условий формирования и оценка естественных ресурсов пресных подземных вод является неотъемлемой частью поисково-разведочных работ по изысканию источника хозяйственно-питьевого водоснабжения конкретных объектов. Естественные ресурсы, представляющие собой обеспеченный суммарным питанием среднесуточный расход потока подземных вод, определяют также потенциальные возможности использования подземных вод отдельных территорий (регионов) — их ресурсный потенциал [10]. Учитывая современное антропогенное (техногенное) воздействие на окружающую среду в целом, и подземные воды в частности, в настоящих условиях следует говорить об антропогенно-естественных или «сложившихся» [8] ресурсах подземных вод.

Для верхней гидрогеодинамической зоны интенсивного водообмена процессы формирования инфильтрационного питания (ИП) и естественных ресурсов подземных вод (ЕРПВ) тесно взаимосвязаны. Инфильтрационное питание, которое характеризует поступление атмосферной влаги на свободную поверхность грунтовых вод, является составной, а часто — основной частью ресурсов подземных вод зоны интенсивного водообмена. В региональном масштабе инфильтрация атмосферной влаги формирует не только грунтовый сток, но и питание более глубоких водоносных горизонтов — за счёт нисходящего площадного перетекания. В границах крупных речных бассейнов (площадью более 2 тыс. км² [9]), где происходит практически полное дренирование водоносных горизонтов зоны интенсивного водообмена, можно полагать, что среднесуточные величины ИП и ЕРПВ равны, поскольку взаимодействие с глубокими горизонтами зоны затруднённого водообмена в общем балансе является незначительным.

Количественным показателем ЕРПВ является модуль подземного стока, который чаще всего оценивается гидролого-гидрогеологическим методом [7] — по меженному стоку рек или расчленением годового гидрографа. Ограничения этого метода, основанного на допущении о тождестве среднесуточной величины питания подземных вод и их разгрузки в речную сеть, хорошо известны. При таком подходе не учитывается эвапотранспирационная составляющая разгрузки подземных вод, которая в долинах рек с неглубоким залеганием уровней грунтовых вод (УГВ), даже в гумидном климате, может быть весьма значительна [1] и обуславливать заниженные величины ЕРПВ. Кроме того, данный метод, как правило, позволяет оценивать только региональные, интегральные величины ЕРПВ и не характеризует средне- и крупномасштабную неоднородность условий их формирования, а также не даёт возможность оценить питание и ресурсы подземных вод водоносных горизонтов, не дренируемых местной эрозийной сетью.

Рассмотренные проблемы оценки ЕРПВ могут быть решены на основе геогидрологического моделирования процессов формирования инфильтрационного питания подземных вод и подземного стока [2].

Использование геогидрологических моделей для оценки ЕРПВ

Геогидрологическая модель — это совокупность моделей трансформации и переноса влаги внутри геогидрологического цикла, описывающего движение воды в системе ландшафт—подземные воды зоны интенсивного водообмена — от выпадения осадков на поверхность суши до их поступления в атмосферу, биосферу и поверхностные воды [13].

Принципы использования геогидрологического моделирования для оценки ИП и ЕРПВ в среднем (1:25 000—1:50 000) и региональном (1:100 000—1:200 000) масштабах [2, 6] предполагают проведение районирования исследуемой территории по комплексу метеорологических, ландшафтных, почвенных, гидрологических и гидрогеологических факторов, в совокупности определяющих « типовые » условия формирования ИП. Для всех выделенных типовых условий ИП проводится геогидрологическое моделирование водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации на основе многолетних метеорологических данных, а полученные в результате расчётов среднесуточные величины ИП распространяются на площади с идентичными ландшафтными, геолого-почвенными и гидролого-гидрогеологическими условиями речных бассейнов и характеризуют неоднородность формирования ЕРПВ.

Геогидрологическая модель ИП подземных вод включает два расчётных блока. В первом блоке модели моделируются процессы трансформации осадков на поверхности земли, включающие их задержание растительностью, снегонакопление и снеготаяние, испарение с поверхности растительности и снега, а также образование поверхностного стока (программа SurfBal [6]). Моделирование с суточным шагом по времени проводится на основе многолетних суточных рядов метеорологических данных — осадки, средняя, минимальная, максимальная температуры и влажность воздуха. В результате рассчитываются значения эффективного объёма влаги, потенциально доступной для впитывания в почву, а также суточные значения потенциального испарения и потенциальной транспирации, которые определяют условия на верхней границе второго блока, представленного моделью нестационарного влагопереноса в зоне аэрации и транспирационного отбора влаги корнями растений — программа HYDRUS-1D [14]. Нисходящий расчётный расход через нижнюю границу модели, на которой задается положение УГВ, характеризу-

ет инфильтрационное питание, а восходящий — эвапотранспирационную разгрузку подземных вод.

Данный подход использован для оценки ЕРПВ и их распределения в разрезе зоны интенсивного водообмена на площади поисково-оценочных работ для выявления дополнительных источников водоснабжения южной части г. Смоленска.

Характеристика объекта исследований, постановка и проведение геогеологического моделирования

Возможность дополнительного использования подземных вод средне—верхнефаменского водоносного комплекса, который на рассматриваемой территории эксплуатируется рядом крупных централизованных водозаборов, во многом определяется сложившимися антропогенно-естественными условиями формирования ресурсов подземных вод, что требует проведения их количественной оценки.

Территория поисково-оценочных работ (1660 км²) представляет собой относительно высокую слабо-расчлененную пологохолмистую равнину, находится на западном склоне Смоленско-Московской возвышенности и принадлежит бассейну верхнего течения р. Днепр.

Климат района умеренно-континентальный. По данным метеостанции г. Смоленск многолетняя среднегодовая температура воздуха составляет

+4,9°C, а средняя годовая сумма осадков — 640 мм и варьирует от 247 до 860 мм/год.

Данная территория расположена в краевой части Московского артезианского бассейна, что определяет относительно небольшую мощность зоны интенсивного водообмена и развития пресных вод — от 80 до 140 м. Ресурсы пресных вод приурочены к мощной (иногда до 100 м) толще четвертичных отложений, включающей несколько водоносных горизонтов аллювиальных и водно-ледниковых отложений, разделенных московской и суворовской моренами, и нижележащему средне-верхнефаменскому водоносному комплексу девона (рис. 1).

Анализ гидрогеологических условий территории позволяет заключить, что дренирование целевого средне-верхнефаменского водоносного комплекса осуществляется только р. Днепр, а его притоки, в связи с незначительным эрозионным врезом их долин, дренируют только верхние четвертичные водоносные горизонты. Суммарная величина ресурсов подземных вод, формирующихся в сложившихся условиях, теоретически может быть получена гидрометрическим методом по приращению меженного расхода р. Днепр в створах, на границах площади поисково-оценочных работ. Однако в связи с большим транзитным меженным расходом р. Днепр (порядка 37,5 м³/с) измеренное та-

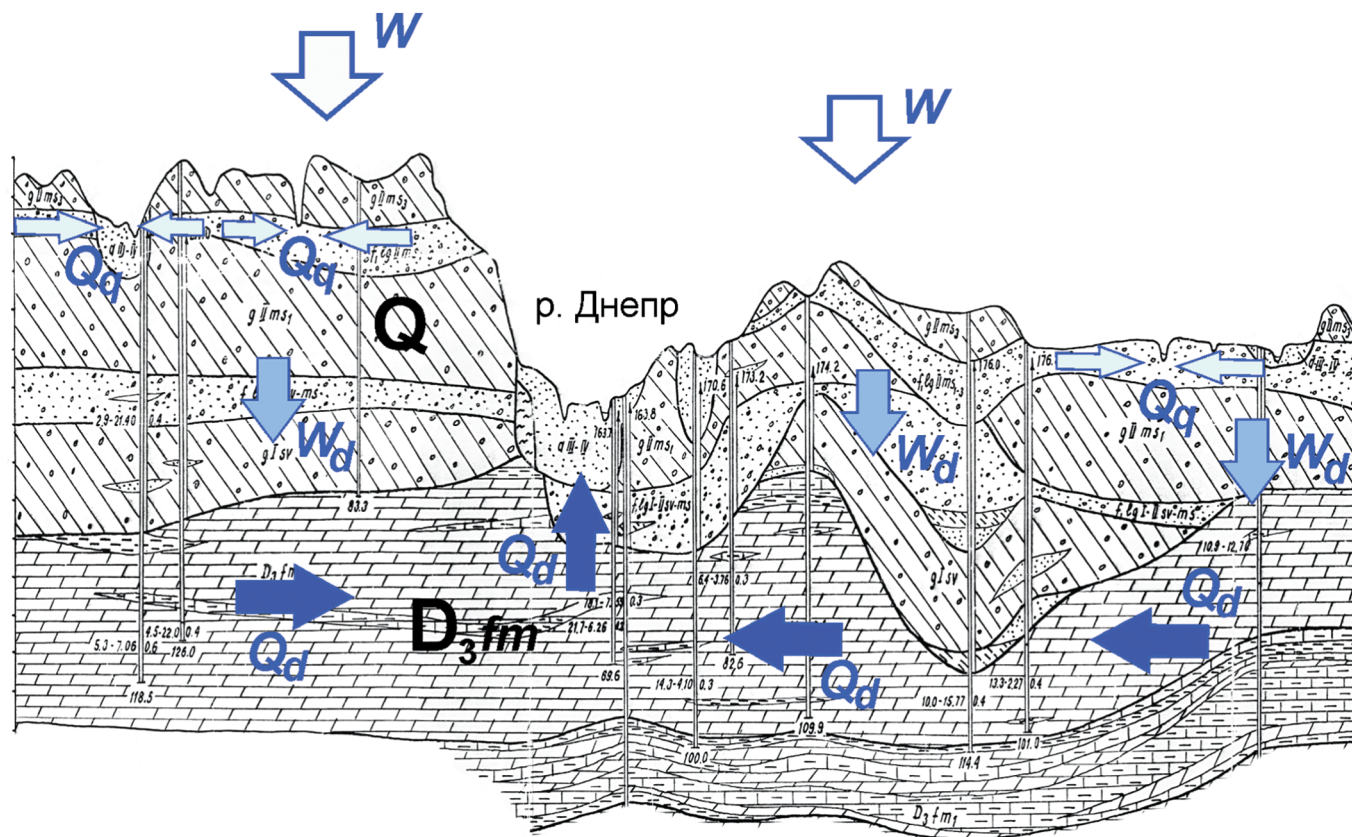


Рис. 1. Схема формирования ресурсов подземных вод четвертичного (Q) и средне—верхнефаменского (D_{3fm}) комплексов: W — инфильтрационное питание, Q_d — грунтовый подземный сток W_d, Q_d — питание и подземный сток средне-верхнефаменского комплекса

ким образом приращение её расхода ($0,2 \text{ м}^3/\text{с}$) оказывается существенно меньше стандартной ошибки гидрометрического измерения [11] и не может являться характеристикой разгрузки подземных вод. Таким образом, традиционный гидролого-гидрогеологический метод оценки по меженному стоку на данной территории не позволяет оценить ресурсы подземных вод целевого девонского комплекса.

В этих условиях для оценки ресурсов подземных вод целевого средне—верхнефаменского комплекса Q_d использован комплексный подход, основанный на геогидрологическом моделировании условий формирования среднесноголетнего ИП W и гидрометрической оценке меженного стока малых рек — притоков р. Днепр, который характеризует ресурсы подземных вод (подземный сток) четвертичного комплекса Q_q — рис. 1.

Среднесноголетнее ИП W формирует суммарные ЕРПВ Q на рассматриваемой площади F :

$$Q = W F. \quad (1)$$

Ресурсы подземных вод комплекса четвертичных отложений оцениваются по меженному стоку дренирующих их притоков Q_q , который сформирован частью общего питания W_q :

$$W_q = \frac{Q_q}{F}. \quad (2)$$

Тогда ресурсы подземных вод целевого девонского комплекса Q_d , которые формируются за счёт площадного перетекания из вышележащих четвертичных отложений, могут быть охарактеризованы «глубокой» составляющей питания W_d (рис. 1), которая оценивается по разности суммарного питания W и питания четвертичного водоносного комплекса W_q :

$$Q_d = W_d F, \quad W_d = W - W_q, \quad (3)$$

Таким образом, на основе полученных с помощью геогидрологического моделирования величин среднесноголетнего ИП и меженных расходов малых рек территории проведена оценка ресурсов подземных вод целевого девонского комплекса как в целом для территории, так и в границах её отдельных водосборных бассейнов.

Геогидрологическое моделирование проведено на основе районирования территории по главным факторам, определяющим различия условий формирования ИП [6]. Условия поверхности водосборов охарактеризованы тремя типами: открытая — «поле» (луг); частично закрытая — «лес»; и полностью закрытая — городская (застроенная и асфальтированная) территории.

Неоднородность почвенного покрова охарактеризована различием его литологического состава, в котором выделены следующие основные типы:

преимущественно песчаный — на площади развития с поверхности флювиогляциальных отложений; песчано-супесчаный — в долине р. Днепр; легкосуглинистый, лёссовидный — на большей части территории; тяжелосуглинистый, моренный — локально развитый на водоразделах северной и северо-западной частях территории.

Различие глубины залегания УГВ, которое определяет мощность пород зоны аэрации и влияет на процессы формирования ИП, охарактеризовано на основе схемы гидроизогипс первого от поверхности грунтового горизонта. Анализ характерной зависимости среднесноголетнего инфильтрационного питания от глубины залегания УГВ показывает, что в интервале глубин УГВ до 1—3 м в течение года в зоне аэрации может превалировать восходящее движение влаги, соответствующее среднесногодовой эвапотранспирационной разгрузке подземных вод (формально отрицательные величины ИП). До глубины УГВ, в среднем 5 м, среднесноголетнее ИП возрастает с глубиной, а далее — становится постоянным и практически не зависит от его положения [2, 12]. Таким образом, для районирования территории использованы следующие интервалы глубин до УГВ, при которых условия формирования инфильтрационного питания наиболее изменчивы:

0—3 м — поймы и речные террасы, где условия питания или разгрузки подземных вод определяются ландшафтными условиями;

3—5 м — склоны и поверхности местных водоразделов, где среднесноголетнее питание грунтовых вод зависит от положения их уровня;

> 5 м — высокие водораздельные пространства, ИП не зависит от УГВ.

Схематизация строения и состава пород зоны аэрации произведена по материалам съёмочных работ разных лет — карт четвертичных отложений, разрезов скважин и шурфов. В результате выделено несколько типов однородного и неоднородного строения зоны аэрации, в зависимости от взаимного расположения в её разрезе песчаных (аллювиальных и водно-ледниковых), супесчаных (аллювиальных и озёрно-ледниковых) и суглинистых (моренных) отложений. Однако, как показали первые результаты моделирования, состав пород нижней части зоны аэрации, даже при её значительной мощности, практически не оказывает влияние на величины формирующегося среднесноголетнего ИП — разница в расчётных значениях при однородном и неоднородном строении не превышает 1 мм/год. Это позволило далее рассматривать только три типа строения зоны аэрации (при отдельном учёте состава почвенного покрова) — песчаный, супесчаный и суглинистый.

В результате проведённого районирования для данной территории моделировались 24 типа условий ИП, в зависимости от сочетания рассмотрен-

ных природных факторов. Метеорологические условия на верхней границе расчётных моделей представлены суточными рядами температур и осадков по метеостанции г. Смоленск за период 1950–2009 гг. (60 лет) и определяют расчётный срок моделирования, что позволяет получать среднемноголетние характеристики ИП.

Для расчётов использованы обобщенные (средние) параметры моделей формирования водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации, которые отражают основные различия процессов влагопереноса, в зависимости от литологического состава почвы и зоны аэрации [3], а также различную транспирационную способность травянистой и древесной растительности, в зависимости от почвенного покрова [4].

Результаты моделирования среднемноголетнего водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации показывают, что расчётные величины ИП для рассматриваемой территории, в зависимости от ландшафтных и гидрогеологических условий меняются от 0–10 мм/год (при неглубоком УГВ) до 160–170 мм/год — на лесных ландшафтах с песчаным и супесчаным составом почвы и пород зоны аэрации. При этом полученные модельные зависимости среднемноголетнего ИП от глубины УГВ Z_g на разных ландшафтах (рис. 2) хорошо аппроксимируются уравнением И.С. Пашковского [12]:

$$w = w_p + (w_p - w^0) \exp \frac{Z_g}{z_0}, \quad (4)$$

где w_p — постоянная величина питания при глубоком залегании УГВ, z_0 и w^0 — константы. Расчётные кривые показывают, что критическая глубина залегания УГВ, при которой среднемноголетние условия питания сменяются на условия оттока с УГВ и эвапотранспирационную разгрузку, больше на открытых полевых ландшафтах и закономерно возрастает при «утяжелении» состава почвы и зоны аэрации — от песчаного к суглинистому (рис. 2).

Полученные результаты моделирования легли в основу карты среднемноголетнего ИП, которая построена путём объединения отдельных площадей в границах выделенных типов ИП, которые характеризуются незначительными различиями расчётных значений среднемноголетней инфильтрации. Они представлены на карте (рис. 3) соответствующей цветовой заливкой, диапазоном среднемноголетних величин ИП, а также его средневзвешенным по площади значением W_{cp} :

$$W_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N W_i f_i}{\sum_{i=1}^N f_i}, \quad (5)$$

где N — число районов площадью f_i со значениями инфильтрации W_i определённого диапазона.

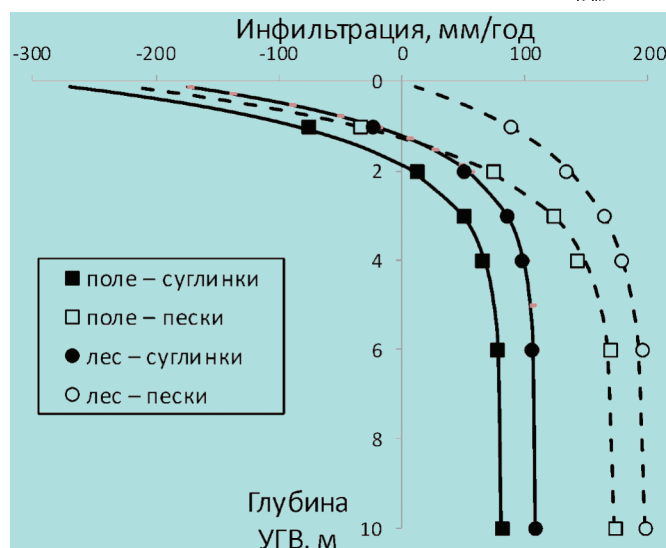


Рис. 2. Расчётные зависимости среднемноголетнего инфильтрационного питания от глубины залегания уровня грунтовых вод при различных ландшафтных условиях

Для территории г. Смоленск моделирование не проводилось, так как принято, что здесь формируется техногенное питание подземных вод за счёт утечек из городских коммуникаций. Его величина, рассчитанная как 4–5% от водопотребления, составляет в среднем 43 мм/год. Как следует из рис. 3, большая часть рассматриваемой территории характеризуется величинами среднемноголетней инфильтрации порядка 100 мм/год. Более высокие значения (до 140–170 мм/год) характерны для северо-запада территории, а более низкие (до 40–50 мм/год) — для её юго-восточной части. Расчётное значение среднемноголетней суммы ИП и поверхностного стока в среднем для территории составляет 200 мм/год и характеризуется площадным модулем 6,3 л/с км², что соответствует модулю среднегодового речного стока по стационарному посту Гидрометслужбы в г. Смоленск (6,53 л/с км²) и среднему слою годового стока 206 мм. Это является подтверждением адекватности полученных расчётных показателей питания и стока природным условиям территории.

Оценка ЕРПВ. Суммарная величина ЕРПВ рассчитывается на основе карты среднемноголетнего ИП, согласно (1), в котором правая часть представлена суммой произведений W_{cp} и F для выделенных зон питания. Полученная таким образом величина ЕРПВ составляет 5,89 м³/с, соответствует модулю подземного стока 3,6 л/с км² и среднему ИП 113 мм/год. По результатам гидрометрической съёмки малых рек модуль годового подземного стока, рассчитанный по меженным расходам 50-процентной вероятностью превышения, в среднем для территории составляет 2,2 л/с км², что отвечает «грунтовой» составляющей питания $W_q = 69$ мм/год. Таким образом, согласно (3), питание целевого дельтовского водоносного комплекса W_d составляет

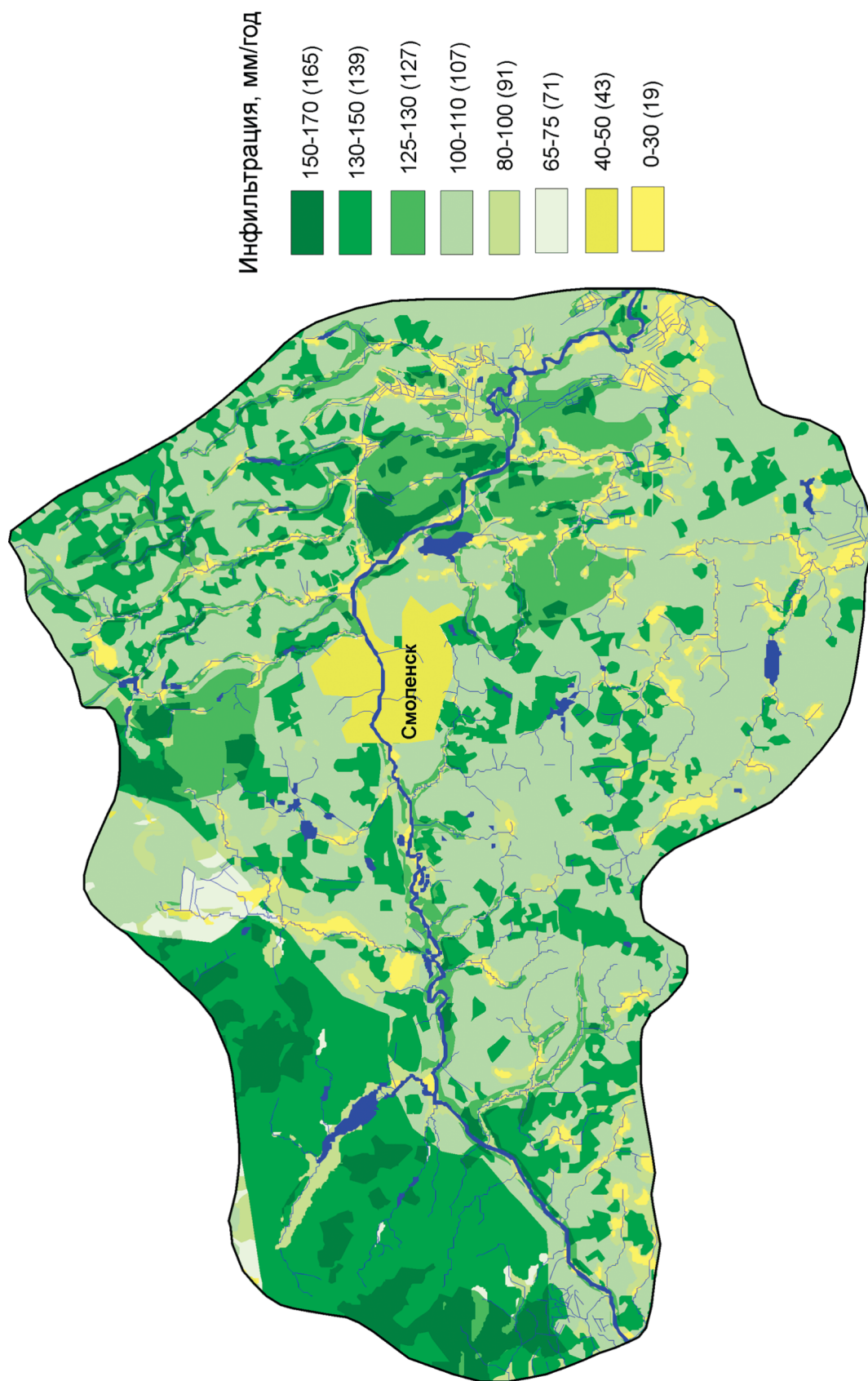


Рис. 3. Карта среднеегодового инфильтрационного питания территории исследования

Таблица 1

Естественные ресурсы и среднегодовое инфильтрационное питание подземных вод на территории поисково-оценочных работ

Интервал разреза	Q		W		Доля, %
	Расход		Модуль, л/с км ²	Слой, мм	
	м ³ /с	тыс.м ³ /сут			
Вся зона интенсивного водообмена (Q, W)	5,9	509,3	3,6	112,5	100
Вся зона интенсивного водообмена (Q, W)	5,9	509,3	3,6	112,5	100
Четвертичный комплекс (Q_q, W_q)	3,6	311,1	2,2	68,7	61
Девонский комплекс (Q_d, W_d)	2,3	198,1	1,4	43,8	39

Таблица 2

Характеристика естественных ресурсов и среднегодового инфильтрационного питания подземных вод на площади речных бассейнов притоков р. Днепр

Река, водосбор	Площадь, F , км ²	Суммарные		Четвертичный комплекс		Девонский комплекс		
		расход Q , м ³ /с	модуль, W , л/с км ²	расход Q_q , м ³ /с	модуль, W_q , л/с км ²	расход Q_d , м ³ /с	модуль, W_d , л/с км ²	доля, %
Сож	251,3	0,84	3,34	0,62	2,45	0,22	0,88	26,4
Ольшанка	110,2	0,37	3,41	0,18	1,68	0,19	1,73	50,7
Нагать	83,4	0,28	3,40	0,09	1,09	0,19	2,31	67,9
Уфинья	86,9	0,31	3,56	0,07	0,75	0,24	2,81	79,0
Еровенка	53,8	0,21	3,51	0,04	0,65	0,17	2,86	81,6

44 мм/год и формирует его ресурсы на данной территории в количестве 2,3 м³/с (модуль 1,4 л/с км²) (табл. 1).

В целом на рассматриваемой территории «глубокая» часть суммарного питания, поступающая в средне-верхнефаменский водоносный комплекс девона, составляет порядка 39%. Однако расчёты, проведённые для отдельных речных бассейнов территории, показывают, что доля питания глубоких интервалов разреза существенно меняется — от 5 до 80% (табл. 2) и закономерно снижается с увеличением площади водосбора (рис. 4). Доля «грунтовой» составляющей питания наоборот увеличивается с увеличением площади речного бассейна. Это объясняется более глубоким эрозионным врезом более крупных притоков, вследствие чего они дренируют большую часть четвертичного комплекса и соответственно меньшая часть суммарного пи-

тания при этом поступает в нижние интервалы разреза и девонский комплекс. Аналогичная закономерность была отмечена при анализе распределения ЕРПВ в зоне интенсивного водообмена в бассейне р. Вологда [1].

Полученные величины доли «глубокой» составляющей инфильтрационного питания подземных вод и подземного стока на разных участках территории верифицируются далее на геофильтрационной модели территории и в свою очередь являются количественными критериями для калибровки параметров гидрогеодинамического взаимодействия четвертичного и средне-верхнефаменского водоносных комплексов. В результате верификации достигнуто удовлетворительное соответствие величин «глубокой» составляющей питания и модельных расходов перетекания из четвертичного комплекса в девонский, как на площади отдельных речных бассейнов, так и для всей территории поисково-оценочных работ (табл. 3). При этом значения коэффициента перетока, представляющего отношение коэффициента фильтрации разделяющих отложений к их мощности, для четвертичного

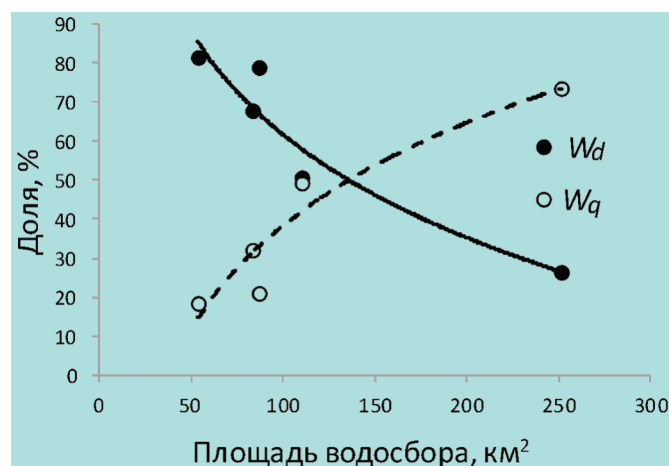
Рис. 4. Зависимости доли «глубокого» W_d и «грунтового» W_q питания от площади водосбора

Таблица 3

Сопоставление величин ЕРПВ средне-верхнефаменского водоносного комплекса, полученных по расчётам ИП и перетекания

Река, водосбор	Расход Q_d по расчёту, м ³ /с		Невязка	
	питания	перетекания	м ³ /с	%
Сож	0,222	0,219	0,003	1,4
Ольшанка	0,191	0,206	-0,015	7,3
Нагать	0,193	0,182	0,011	6
Уфинья	0,244	0,237	0,007	2,9
Еровенка	0,168	0,175	-0,007	4
Вся территория	2,3	2,6	-0,3	-11,8

комплекса составили от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ сут⁻¹. Такая значительная вариация параметров перетекания из четвертичного комплекса обусловлена различной мощностью слабопроницаемых моренных отложений в его составе, определяющих интенсивность его взаимодействия с нижележащим девонским комплексом (рис. 1).

Таким образом, результаты геофильтрационного моделирования гидрогеодинамически подтверждают балансовые оценки ЕРПВ средне—верхнефаменского водоносного комплекса, полученные на основе геогидрологических моделей условий формирования ИП.

Выводы

Рассмотренная методика оценки ЕРПВ, основанная на геогидрологическом моделировании условий формирования ИП, является альтернати-

вой или дополнением традиционного гидролого-гидрогеологического метода, поскольку позволяет количественно охарактеризовать ландшафтную неоднородность условий формирования ЕРПВ, учитывает их «эвапотранспирационную» составляющую и количественно характеризует связь среднемноголетнего ИП с глубиной УГВ. Также в комплексе с гидрометрическими методами это даёт возможность оценить ресурсы более глубоких интервалов гидрогеологического разреза, не дренируемых местной эрозионной сетью. Для территории поисково-оценочных работ для водоснабжения г. Смоленска данная методика позволила оценить ЕРПВ целевого средне—верхнефаменского водоносного комплекса, и адекватность проведённой оценки ЕРПВ подтверждена результатами геофильтрационного моделирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-05-00841.

ЛИТЕРАТУРА

1. Всеволожский В.А., Гриневский С.О. Оценка естественных ресурсов подземных вод с использованием балансово-гидродинамических моделей // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 4. С. 410–416.
2. Гриневский С.О. Оценка инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод на основе геогидрологических моделей. Дис. докт. геол.-минер. наук. М.: МГУ, 2012. 382 с.
3. Гриневский С.О. Схематизация строения и параметров зоны аэрации для моделирования инфильтрационного питания подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 6. С. 56–67.
4. Гриневский С.О. Моделирование поглощения влаги корнями растений при расчетах влагопереноса в зоне аэрации и инфильтрационного питания подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2011. № 3. С. 41–52.
5. Гриневский С.О., Новоселова М.В. Закономерности формирования инфильтрационного питания подземных вод // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 2. С. 169–180.
6. Гриневский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 543–557.
7. Зекцер И.С. Закономерности формирования подземного стока и научно-методические основы его изучения. М.: Наука, 1977. 173 с.
8. Листенгартен В.А. Формирование ресурсов подземных вод аллювиально-пролювиальных равнин. Баку: Изд-во «ЭЛМ». 1987. 164 с.
9. Пашковский И.С. Взаимосвязь подземных и поверхностных вод в окружающей среде. II конференция пользователей и партнеров «Геолинка», Москва, 29–31 мая 2001 г. М.: «ИНФОКОМ-ГЕО». 2001. С. 36–40.
10. Пояснительная записка к Карте ресурсного потенциала пресных подземных вод России. Масштаб 1:5 000 000. М.: ЗАО «ГИДЭК», 2012.
11. Ратнер Н.С. Точность экспедиционных гидрометрических работ при изучении подземного стока. Л. ГМИЗ, Труды ГГИ, 1972. вып.182. С. 51–72.
12. Шестаков В.М., Пашковский И.С., Сойфер А.М. Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. М.: Недра, 1982. 244 с.
13. Шестаков В.М., Поздняков С.П. Геогидрология. М.: Академкнига, 2003. 173 с.
14. Šimůnek J., Šejna M., Saito H. et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Ver. 4.08. // Prepr. Depart. of Environ. Sci. University of California Riverside, California, Riverside, 2009. 296 p.