ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2020, № 6, с. 14–21

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 556.3.626.81+637.67

КРИТЕРИИ РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЗОНЕ г. БИШКЕК – СТОЛИЦЫ КЫРГЫЗСТАНА

© 2020 г. Р. Г. Литвак[1,*], Е. И. Немальцева[2,]**

[1] *Кыргызский научно-исследовательский институт ирригации, ул. Токтоналиева, 4а, г. Бишкек, 720055, Кыргызская Республика*

[2] *Институт водных проблем и гидроэнергетики НАН КР, ул. Фрунзе, 53, г. Бишкек, 720033, Кыргызская Республика*

**E-mail: RLitvak14@gmail.com*

***E-mail: nemek53@rambler.ru*

Поступила в редакцию 01.08.2020 г.
После доработки 24.08.2020 г.
Принята к публикации 24.08.2020 г.

Статья посвящена проблеме рационального размещения дополнительных водозаборов подземных вод в условиях типовых межгорных впадин. Одна из особенностей упомянутых впадин – наличие гидрогеологических зон формирования и выклинивания. Во многих впадинах наблюдается резкое уменьшение водопроводимости при переходе из зоны формирования подземных в зону выклинивания. Работа выполнялась на примере Чуйской долины Кыргызстана, которая является типовой межгорной впадиной. Здесь расположена столица страны г. Бишкек. Граница между зонами формирования и выклинивания делит город на северную и южную часть. При расположении дополнительных водозаборов в северной части (зона выклинивания) улучшается экологическая ситуация в этой зоне, но из-за резкого изменения водопроводимости наблюдается существенное понижение уровней в южной части, которое создает угрозу действующим городским водозаборам. Цель статьи – предложить количественные критерии оценки расположения новых водозаборов, которые не создают угрозы действующим и обеспечивают улучшение экологической ситуации в зоне подтопления. Необходимо отметить, что рассматриваемые дополнительные водозаборы оказывают дренирующее воздействие на склонные к подтоплению земли северной части города. Предложены достаточно простые аналитические критерии для линейных и точечных водозаборов.

Ключевые слова: *межгорная долина*, *водозабор*, *подземные воды*, *экология городских территорий*, *математическая оценка*

DOI: 10.31857/S0869780920060053

ВВЕДЕНИЕ

Столица Кыргызстана г. Бишкек, находится в Чуйской долине, являющейся типичной межгорной впадиной [1, 2] (рис. 1). Подземные воды – единственный источник питьевого водоснабжения Бишкека. Основной водоносный горизонт, используемый для водоснабжения, приурочен к четвертичным отложениям. Южная часть города находится в зоне формирования подземных вод, северная – в зоне выклинивания.

Четвертичные отложения зоны формирования – сравнительно однородный слой крупнообломочных отложений. Зона выклинивания представляет собой слоистую водоносную толщу, водоносные слои отделяются друг от друга слабопроницаемыми прослойками [2, 5, 8]. Водопроводимость зоны формирования превосходит водопроводимость зоны выклинивания в 5–8 раз [2, 5, 8]. Следствие резкого уменьшения водопроводимости – высокое стояние уровней грунтовых вод и подтопление северной части Бишкека. Изучению и защите подземных вод столицы Кыргызстана посвящено значительное число работ, выполненных Кыргызской комплексной гидрогеологической экспедицией и другими организациями, включая организации России. Ряд работ опубликован, например, [1–4, 6, 8, 9, 11–14].

Применительно к целям данной статьи типовой разрез зоны выклинивания подземных вод, параллельный естественному потоку подземных вод, в зоне г. Бишкек представляется в виде двухпластовой четырехслойной схемы, рис. 2. В качестве водоупора принимаются неоген-четвертичные глинистые отложения, залегающие на глубине 300–600 м [1, 2, 8].

В связи с наблюдаемым изменением климата и сокращением площади ледников, которые являются существенным источником питания рек в

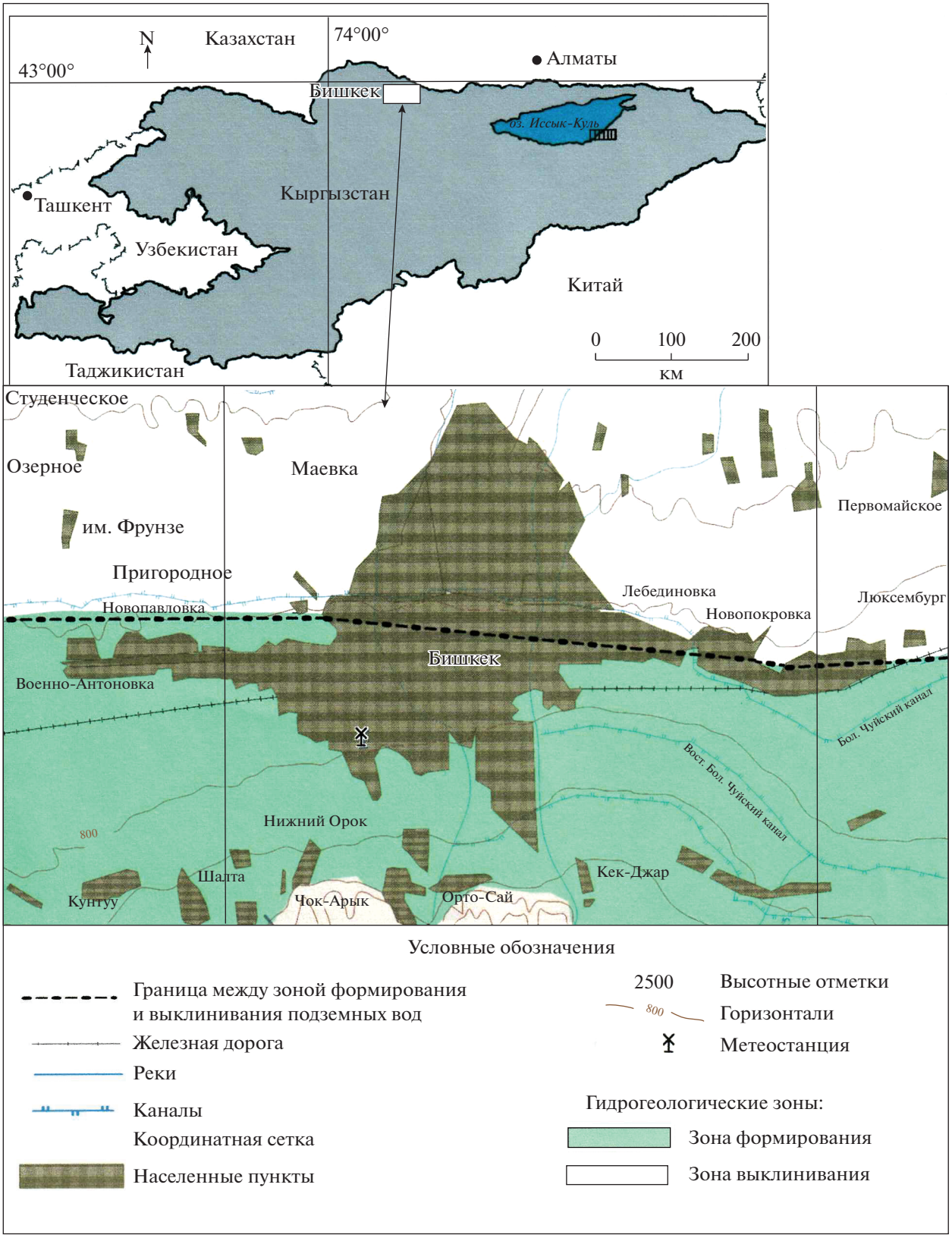

Рис. 1. Район исследований, зона расположения г. Бишкек.

Чуйской долине, прогнозируется дефицит водных ресурсов для орошаемого земледелия. Один из путей его смягчения – научно обоснованное использование подземных вод. В данной статье рассматривается дополнительный водозабор подземных вод для орошения. Связанные с этим сокращения или другие вмешательства в систему действующих водозаборов хозяйственно-питьевого назначения, находящихся в зоне формирования, недопустимы.

В сложившихся условиях очевидна целесообразность использования скважин для улучшения экологической обстановки (осушения) и, одновременно, в качестве дополнительного источника водных ресурсов для водоснабжения и орошения. Основное ограничение для дополнительных водозаборов с дренажным эффектом – влияние на действующие водозаборы в южной части города. После начала их эксплуатации (в 1970-х гг.) средний уровень подземных вод по данным режимной сети Кыргызской комплексной гидрогеологической экспедиции снизился на 7–10 м. Дальнейшее существенное снижение уровней подземных вод в этой части города может создать большие проблемы для водоснабжения. Очевидно, что чем меньше расстояние от границы зоны формирования до рассматриваемого водозабора, тем больше его влияние на уровни подземных вод южной части Бишкека.

Для дальнейшего рассмотрения гидрогеологические условия схематизируются в виде двух пластов, разделенных слабопроницаемой прослойкой. Эксплуатируется нижний пласт. Напор на границе с зоной формирования и в верхнем пласте считается неизменным. При прогнозировании изменений напоров эти предположения весьма грубы. Они дают заниженные понижения напоров в эксплуатируемом пласте. Однако, задача данной статьи – определить соотношение общего фильтрационного сопротивления водозабора и фильтрационного сопротивления между водозабором и зоной формирования. Соотношение определяется для вышеупомянутой упрощенной фильтрационной схемы. Полученный результат предлагается использовать в реальных условиях для приближенной оценки соотношения степеней влияния водозабора на зону формирования и на верхний водоносный пласт. Определение фильтрационных сопротивлений на основе упрощенных фильтрационных схем используется рядом авторов, например, [10].

В качестве критерия рационального расположения водозаборов предлагается отношение

$$F = R/RS,$$

где R – общее фильтрационное сопротивление водозабора; RS – фильтрационное сопротивление между водозабором и зоной формирования подземных вод.

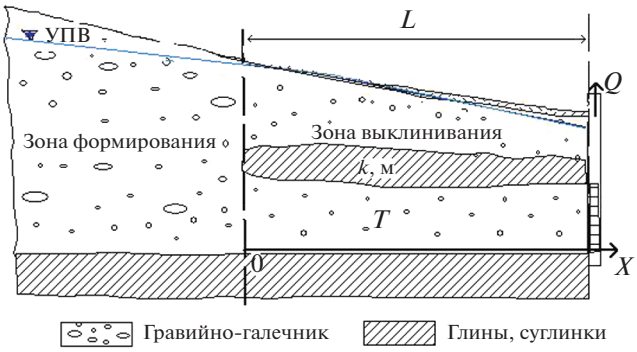

Рис. 2. Схематический разрез для оценки доли притока из зоны формирования в дебите водозабора.

Другими словами, вышеприведенное отношение – это доля воды, поступающая из зоны формирования в общем дебите водозабора. Остальная часть в общем дебите – приток сверху, который вызывает осушительный эффект, полезный для северной части Бишкека. Предлагаемый подход – элемент теории управления в приложении к подземным водам [7].

Цель работы, в рамках данной статьи, – установить зависимости для расчетов критерия F в случае линейного и точечного водозаборов применительно к рассматриваемым природным условиям. Выражения для F получены с учетом перетекания из верхнего водоносного слоя при условии стационарной фильтрации. В зоне формирования и в верхнем водоносном слое напор подземных вод не изменяется.

ЛИНЕЙНЫЕ ВОДОЗАБОРЫ В ЗОНЕ ВЫКЛИНИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Линейное расположение водозаборов весьма перспективно в рассматриваемой зоне. С одной стороны, оно позволяет эффективно решать задачу поставки дополнительных водных ресурсов для ирригации (в случае возникновения дефицита поверхностных вод). Например, пополнение подземной водой дополнительного водозабора вдоль Большого Чуйского канала, расположенного в 1.5 км от границы между зоной формирования и зоной выклинивания подземных вод, позволит обойтись без строительства дополнительной оросительной сети. С другой стороны, рассматриваемое расположение эффективно способствует осушению подтопленных территорий северной части Бишкека.

Однако, как было сказано выше, допускать питание линейного водозабора за счет притока из зоны формирования подземных вод нельзя. Соответствующий количественный критерий оценки расположения новых водозаборов предлагается установить путем сопоставления расчетного

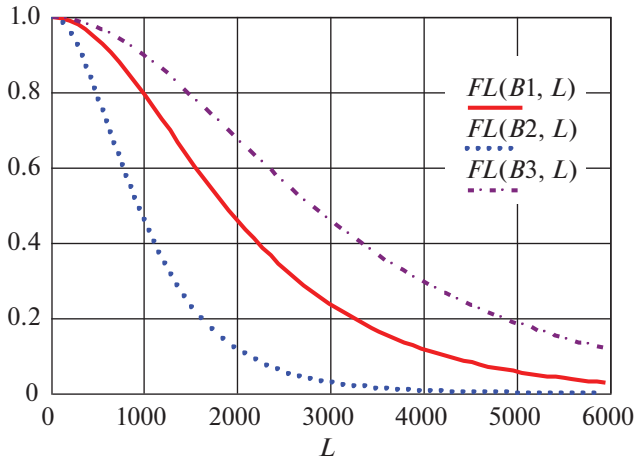

Рис. 3. Величина FL в зависимости от L для параметров перетекания $B1 = B$, $B2 = 0.5B$ и $B3 = 1.5B$ соответственно.

притока и удельного дебита водозабора. Сопоставление производится на базе модели установившейся фильтрации с учетом перетекания из соседнего водоносного горизонта (см. рис. 2).

В большинстве случаев при расчетах линейных водозаборов предполагается, что они имеют бесконечную длину. Ряд скважин (с фиксированным расходом скважины Q м^3/сут) обычно схематизируется траншеей с водозабором одного погонного метра q м^2/сут. При этом $q = Q/a$, где a – расстояние между водозаборными скважинами. Рассматривается фильтрационная схема пласт–полоса (от границы зон формирования и выклинивания до линии водозабора).

Исходные данные приняты по результатам опытно-фильтрационных работ, проводимых на протяжении многих лет Кыргызской комплексной гидрогеологической экспедицией и рядом других организаций.

Уравнение фильтрации и соответствующие граничные условия имеют вид:

$$\frac{d^2}{dx^2}S(x) - \frac{1}{B^2}S(x) = 0, \qquad (1)$$

$$S(0) = 0, \quad T\left(\frac{d}{dx}S(L)\right) = -q, \qquad (2)$$

где $S(x)$ – понижение уровней подземный вод от действия водозабора на расстоянии x от границы постоянного напора, м; q – дебит единицы длины водозабора, м^2/сут; T – водопроводимость, м^2/сут; B – параметр перетекания, м:

$$B = \sqrt{\frac{mT}{k}},$$

m – мощность слабопроницаемой прослойки, м; k – коэффициент фильтрации слабопроницаемой прослойки, м/сут.

Общее решение уравнения (1) известно из теории дифференциальных уравнений, оно имеет вид:

$$S(x) = C1 \cdot \exp(x/B) + C2 \cdot \exp(-x/B), \qquad (3)$$

где $C1$ и $C2$ – произвольные постоянные, которые определяются из граничных условий. Опуская промежуточные выкладки, получим:

$$S(x) = \frac{qB}{T\left(\exp\left(\frac{L}{B}\right) + \exp\left(\frac{-L}{B}\right)\right)}\left(\exp\left(\frac{-x}{B}\right) - \exp\left(\frac{x}{B}\right)\right), \qquad (4)$$

Удельный приток к водозабору на расстоянии x от границы зоны формирования $q1(x)$ равен:

$$q1(x) = -T\left(\frac{d}{dx}S(x)\right) = q\frac{\exp\left(\frac{x}{B}\right) + \exp\left(\frac{-x}{B}\right)}{\exp\left(\frac{L}{B}\right) + \exp\left(\frac{-L}{B}\right)}. \qquad (5)$$

Приток к водозабору через границу зон формирования и выклинивания $qs(B, L)$ (который необходимо минимизировать) равен:

$$qs(B, L) = \frac{2q}{\exp\left(\frac{L}{B}\right) + \exp\left(\frac{-L}{B}\right)}. \qquad (6)$$

Доля притока $FL(B, L)$ из зоны формирования в дебите водозабора, которая является количественным критерием возможности расположения водозабора в рассматриваемых условиях, выражается зависимостью:

$$FL(B, L) = \frac{R}{RS} = \frac{qs(B, L)}{q} = \frac{2}{\exp\left(\frac{L}{B}\right) + \exp\left(\frac{-L}{B}\right)}. \qquad (7)$$

На рис. 3 приведены зависимости $FL(B,L)$ при гидрогеологических параметрах зоны выклинивания, характерных для окрестностей г. Бишкек [2, 5, 8]: $T = 500$ м^2/сут, $k = 0.01$ м/сут, $m = 40$ м, $Q = 50$ л/с. В этом случае $B = 1414$ м. Расчеты выполнены для вышеприведенного числового значения параметра перетекания, а также для значений B, увеличенных и уменьшенных на 50%.

FL зависит от расстояния между водозабором и границей зоны формирования, а также от параметра перетекания B. На рис. 3 приведены расчеты FL для различных L, изменяющихся от 0 до 6 км (для трех значений B). Сплошная линия построена по наиболее вероятным значениям параметров, приведенных выше. Если линейный водозабор расположить на расстоянии 1 км от границы с зоной формирования, то 80% его объема будет покрываться за счет притока из этой зоны. Это создаст большую угрозу для действующих водозаборов южной части г. Бишкек.

При расположении водозабора на расстоянии 4 км от рассматриваемой границы ожидаемая доля притока из зоны формирования – 10%, что вполне допустимо. В этом случае водозабор будет улучшать мелиоративное состояние земель северной части Бишкека, которые находятся в подтопленном состоянии.

ТОЧЕЧНЫЕ ВОДОЗАБОРЫ В ЗОНЕ ВЫКЛИНИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Точечный водозабор расположен на расстоянии L от границы с зоной формирования. Для дальнейших "построений" использовано решение для скважины в условиях перетекания, в соседнем водоносном горизонте уровень подземных вод предполагается неизменным. Фильтрационная схема пласта показана на рис. 2. Соответствующие понижения уровня описываются зависимостью [7, 10]:

$$S(r) = \frac{Q}{2\pi T} K0\left(\frac{r}{B}\right), \tag{8}$$

где $S(r)$ – понижение уровней подземных вод от действия водозабора на расстоянии r от точки его расположения, м; Q – дебит водозабора, м^3/сут; $K0(x)$ – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка.

Используется схема полуограниченного пласта. Граница пласта (1-го рода) совпадает с границей зон формирования и выклинивания (см. рис. 2). Искомое решение конструируется с использованием метода источников-стоков. До этого произведен переход от полярной системы координат к декартовой. Понижение от действующего водозабора имеет вид:

$$S(x,y) = \frac{Q}{2\pi T}\left[K0\left[\frac{\sqrt{(x-L)^2+y^2}}{B}\right] - K0\left[\frac{\sqrt{(x+L)^2+y^2}}{B}\right]\right], \tag{9}$$

где L – расстояние от границы до точечного водозабора, м.

На рис. 4 приведены кривые понижений напоров при тех же гидрогеологических параметрах зоны выклинивания, что и в случае линейного водозабора. Расчеты выполнены для значений B, увеличенных и уменьшенных на 50%. Как видно, увеличение параметра перетекания слабее действует на понижения уровней подземных вод, чем его увеличение (максимальное отклонение кривой $S3$ от S составляет 4 м, а максимальное отклонение $S2$ от S – 2 м).

В соответствии с целями исследования необходимо оценить отношение притока через границу пласта к дебиту водозабора Q. Фильтрационный поток, перпендикулярный к границе пласта в любой точке зоны фильтрации, определяется зависимостью:

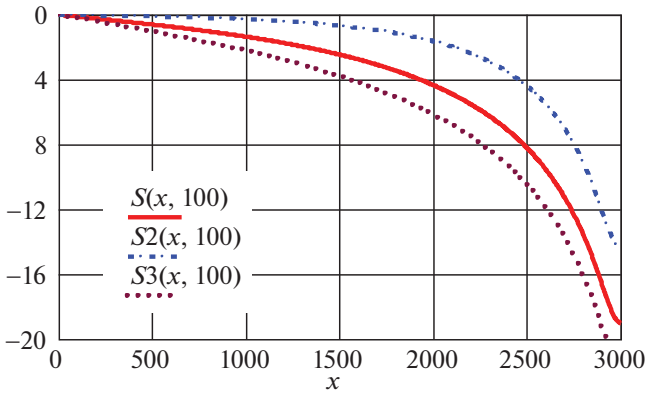

Рис. 4. Кривые понижения уровней подземных вод S, $S2$ и $S3$ на линии перпендикулярной к границе гидрогеологических зон в 100 м от точечного водозабора для параметров перетекания B, $0.5B$ и $1.5B$ соответственно.

$$q(x,y) = -T\left(\frac{d}{dx}S(x,y)\right). \tag{10}$$

После дифференцирования с использованием свойств цилиндрических функций от мнимого аргумента последнее равенство приобретает вид:

$$q(x,y) = \frac{Q}{2\pi B}\left[\frac{L-x}{\sqrt{(x-L)^2+y^2}}K1(Z1) + \frac{L+x}{\sqrt{(x+L)^2+y^2}}K1(Z2)\right], \tag{11}$$

где $K1(x)$ – модифицированная функция Бесселя второго рода первого порядка;

$$Z1 = \frac{\sqrt{(x-L)^2+y^2}}{B}, \quad Z2 = \frac{\sqrt{(x+L)^2+y^2}}{B}. \tag{12}$$

Через единицу длины границы пласта ($x = 0$) поток равен:

$$q(0,y) = \frac{Q}{\pi B}\cdot\frac{L}{\sqrt{L^2+y^2}}K1\left(\frac{\sqrt{L^2+y^2}}{B}\right). \tag{13}$$

Суммарный поток через границу пласта QS равен:

$$QS = \frac{2LQ}{\pi B}\int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{L^2+y^2}}K1\left(\frac{\sqrt{L^2+y^2}}{B}\right)dy. \tag{14}$$

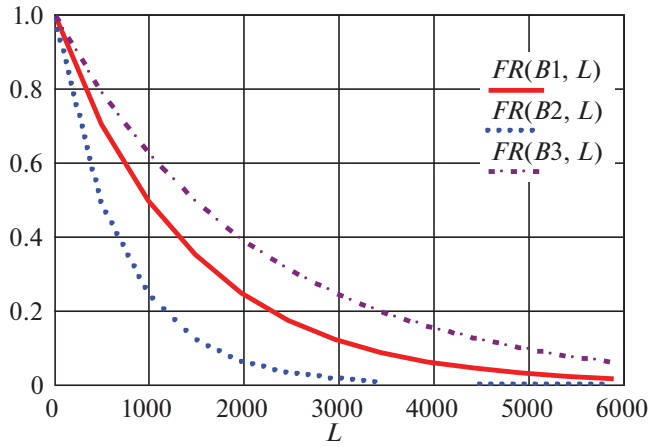

Рис. 5. Величина *FR* в зависимости от *L* для параметров перетекания $B1 = B$, $B2 = 0.5B$ и $B3 = 1.5B$ соответственно.

Критерий *FR*, аналогичный случаю линейного водозабора, принимает вид:

$$F(B,L) = \frac{R}{RS} = \frac{QS}{Q} = \\ = \frac{2L}{\pi B}\int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{L^2+y^2}} K1\left(\frac{\sqrt{L^2+y^2}}{B}\right)dy. \quad (15)$$

Величина *FR* – ожидаемое отношение величины притока из зоны формирования к дебиту водозабора. *FR* зависит от расстояния между водозабором и границей с зоной формирования, а также от параметра перетекания *B*. На рис. 5 приведены расчеты *FR* для различных *L*, изменяющихся от 0 до 6 км (для трех значений *B*). Кривые построены для фильтрационных параметров, характерных для зоны г. Бишкек.

Сплошная линия построена по наиболее вероятным значениям параметров, численные значения приведены выше. Если точечный водозабор расположить на расстоянии 1 км от границы с зоной формирования, то более половины объема водозабора будет покрываться за счет притока из этой зоны. Это создаст угрозу для действующих водозаборов южной части г. Бишкек. При линейном водозаборе, находящимся на этом расстоянии, – 80% водозабора будет покрываться притоком из зоны формирования.

При расположении водозабора на расстоянии 3 км от рассматриваемой границы, ожидаемая доля притока из зоны формирования – примерно 10%. Для линейного водозабора, расположенного на этом же расстоянии от границы зон, доля упомянутого притока – более 20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные количественные критерии позволяют оценить возможность расположения дополнительных водозаборов г. Бишкека на различных расстояниях от границы с зоной выклинивания, которые не создают угрозы действующим водозаборным скважинам. Рассматривается каптирование нижнего водоносного слоя скважинами глубиной 150–250 м, характерными для водозаборов города (см. рис. 2). Водозабор из верхнего слоя не всегда соответствует питьевым нормам. Однако в этом случае дренажный эффект более заметен.

Один из вариантов выбора и обоснования расположения водозабора – создание сеточной модели с использованием, например, программы Modflow. Однако цель данного исследования – разработка простых критериев предварительной оценки возможностей расположения водозаборов. Необходимо отметить, что дополнительные водозаборы улучшают экологическую ситуацию, оказывая полезное дренирующее воздействие на склонные к подтоплению земли северной части города.

Полученные аналитические критерии для линейных и точечных водозаборов могут использоваться проектными и производственными организациями, они применимы в других межгорных впадинах, имеющих характерные гидрогеологические условия.

Результаты исследования приобретают особую актуальность в условиях ожидаемого сокращения стока рек и предстоящей необходимостью использования подземных для покрытия дефицита водных ресурсов, требуемых для орошения.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного проекта “Разработка рациональных схем управления подземными водами центральной части Чуйской долины для устойчивого орошения в условиях изменения климата на основе фильтрационных моделей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гидрогеология СССР*, т. XI. Киргизская ССР / Под ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1977. 290 с.
2. *Григоренко П.Г.* Подземные воды бассейна р. Чу и перспективы их использования. Фрунзе: Илим, 1979. 187 с.
3. *Каплинский М.И.* Прогнозирование изменений дренажного стока под влиянием водохозяйственных мероприятий. Фрунзе: Илим, 1977. 93 с.
4. *Каплинский М.И.* Комплексное использование поверхностных и подземных вод межгорных впадин (на примере Чуйской впадины Киргизской ССР) // Некоторые вопросы развития мелиорации в СССР. М.: Колос,1975. С. 99–115.
5. *Карпов В.Г.* Фильтрационные свойства и ресурсы подземных вод четвертичных отложений Чуйской

впадины. Дис. канд. геол-мин. наук: Фрунзе, 1972. 157 с.

6. *Кожобаев К.А., Молдогазиева Г.Т., Бекболотова С.Д., Детушев А.В.* К методике оценки степени защищенности подземных вод в условиях Кыргызской Республики // Геоэкология. 2008. № 4. С. 373–376.
7. *Концебовский С.Я., Минкин Е.Л.* Гидрогеологические расчеты при использовании подземных вод для орошения. М.: Недра, 1989. 253 с.
8. *Литвак Р.Г.* Решение гидрогеологических проблем математическим моделированием в условиях межгорных долин Кыргызстана: дис. докт. техн. наук. Бишкек, 2019. 209 с.
9. *Маматканов Д.М., Мандычев А.Н., Романовский В.В., Ерохин С.А.* Подтопление грунтовыми водами населённых пунктов Чуйской впадины // Известия Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. 1998. № 4. С. 77–79.
10. *Шестаков В.М.* Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. М.: МГУ, 1965. 221 с.
11. *Litvak R.G., Nemaltseva E.I., Tolstihin G.M.* Groundwater Environment in Bishkek, Kyrgyzstan // Groundwater Environment in Asian Cities: Concepts, Methods and Case Studies. Elsevier. 2015. Chapter 17. P. 383–412.
12. *Litvak R.G., Nemaltseva E.I., Morris B.L.* Groundwater vulnerability assessment for intermountain valleys using Chu Valley of Kyrghyzstan as example // Groundwater and Ecosystems. Nato Science Series. Springer. 2006. P. 107–120.
13. *Morris B.L., Darling W.G., Gooddy D.C., Litvak R.G., Neumann I., Nemaltseva E.I., Poddubnaia I.V.* Assessing the extent of induced leakage to an urban aquifer using environmental tracers: an example from Bishkek, capital of Kyrgyzstan, Central Asia // Hydrogeology Journal. Springer. Vol. 14. № 1–2. January 2006. P. 225–243.
14. *Morris B.L., Litvak R.G., Ahmed K.M.* Urban Groundwater protection and management: lessons from developing cities in Bangladesh and Kyrghyzstan // Current Problems of Hydrogeology in Urban Areas, Urban Agglomerates and Industrial Centres / NATO Science Series. IV. Earth and Environmental Sciences. Vol. 8. Baku, Azerbaijan. 29 May–1 June 2002. P. 77–102.

CRITERIA FOR THE RATIONAL LOCATION OF GROUNDWATER INTAKES IN THE AREA OF BISHKEK, THE CAPITAL OF KYRGYZSTAN

R. G. Litvak[a,#] and E. I. Nemaltseva[b,##]

[a] *Kyrgyz Scientific and Research Institute of Irrigation, ul. Toktonalieva, 4a, Bishkek, 720055 Kyrgyz Republic*

[b] *Institute of Water Problems and Hydropower Engineering, Kyrgyz Academy of Science, ul. Frunze, 53, Bishkek, 720033, Kyrgyz Republic*

[#] *E-mail: RLitvak14@gmail.com*

[##] *E-mail: nemek53@rambler.ru*

This article is devoted to the issue of reasonable locating of additional ground water intakes under the typical conditions of intermountain depressions. One of the features of the mentioned depression is the occurrence of recharge and discharge hydrogeological zones. In many depressions, water conductivity falls abruptly upon the transition from a recharge to discharge zones. The Chu valley in Kyrgyzstan, which is a typical intermountain depression, was taken as an example for the study. The capital city of Bishkek is located here. The boundary between recharge and discharge zones divides the city into the northern and southern parts. Upon locating additional groundwater intake facilities in the northern part (the discharge zone), a significant decrease in water levels is observed in its southern part endangering the existing groundwater intakes in the city. The aim of this article is to suggest some quantitative assessment criteria for the location of new groundwater intakes, which do not create any threat to already operating facilities in the recharge zone. The considered additional groundwater intake facilities exert a draining effect on the areas at risk of waterlogging within the northern part of the city. We propose some analytical criteria for linear and point groundwater intakes, which are simple enough for use.

Keywords: *intermountain valley*, *groundwater intake*, *ecology of urban areas*, *mathematical assessment*

REFERENCES

1. *Gidrogeologia SSSR. Tom XI. Kirgizskaya SSR* [Hydrogeology of the USSR. Vol. XI. Kirgizskaya SSR]. Sidorenko, A.V., Ed., Moscow, Nedra Publ., 1977, 290 p. (in Russian)
2. Grigorenko, P.G. *Podzemnye vody basseina r. Chu i perspektivy ikh ispolzovaniya* [Groundwater of the Chu river basin and perspectives of their use]. Frunze, Ilim Publ., 1979, 187 p. (in Russian)
3. Kaplinskii, M.I. *Prognozirovanie izmenenii drenazhnogo stoka pod vliyaniem vodokhozyaistvennykh meropriyatii* [Prediction of changes in drainage discharge under the influence of water management measures], Frunze, Ilim Publ., 1977, 93 p. (in Russian)

4. Kaplinskii, M.I. *Kompleksnoe ispol'zovanie poverkhnostnykh i podzemnykh vod mezhgornykh vpadin (na primere Chuiskoi vpadiny Kirgizskoi SSR*) [Integrated use of surface- and groundwater of intermountain depressions (by the example of Chu Valley of Kyrgyzstan)]. In: *Nekotorye voprosy razvitiya melioratsii v SSSR* [Some issues of the development of land reclamation in the USSR]. Moscow, Kolos, Publ., 1975, p. 99–115. (in Russian)
5. Karpov, B.G. *Fil'tratsionnye svoistva i resursy podzemnykh vod chetvertichnykh otlozhenii Chuiskoi vpadiny* [Filtration properties and groundwater resources of the Quaternary deposits in the Chu depression]. Doctoral Sci. (Techn.) Diss., Frunze, 1972, 157 p. (in Russian)
6. Kozhobaev, K.A., Moldogazieva, G.T., Bekbolotova, S.D., Detushev, A.V. *K metodike otsenki stepeni zashchishchennosti podzemnykh vod v usloviyakh Kyrgyzskoy Respubliki* [To the methodology for assessing the groundwater protection degree in the Kyrgyz Republic]. *Geoekologiya*, 2008, no. 4, pp. 373–376. (in Russian)
7. Kontsebovskii, S.Ya., Minkin, E.L. *Gidrogeologicheskie raschety pri ispolzovanii podzemnykh vod dlya oroshenia* [Hydrogeological computation upon the groundwater use in irrigation], Moscow, Nedra Publ., Moscow, 1989, 253 p. (in Russian)
8. Litvak, R.G. *Resheniye gidrogeologicheskikh problem matematicheskim modelirovaniem v usloviyakh mezhgornykh dolin Kyrgyzstana* [Solution of hydrogeological problems by mathematical modeling in the conditions of intermountain valleys of Kyrgyzstan]. Doctoral Sci. (Techn.) Diss., Bishkek, 2019, 209 p. (in Russian)
9. Mamatkanov, D.M., Mandychev, A.N., Romanovskii, V.V., Erokhin, S.A. *Podtopleniye gruntovymi vodami naselonnykh punktov Chuyskoi vpadiny* [Groundwater flood of built-up areas in the Chu depression]. *Izvestiya Natsional'noi Akademii Nauk Kyrgyzskoi Respubliki*, 1998, no. 4, p. 77–79. (in Russian)
10. Shestakov, V.M. *Teoreticheskie osnovy otsenki podpora, vodoponizheniya i drenazha* [Theoretical foundations for assessing backwater, dewatering and drainage]. Moscow, MGU Publ., 1965, 221 p. (in Russian)
11. Litvak, R.G., Nemaltseva, E.I., Tolstihin, G.M. Groundwater environment in Bishkek, Kyrgyzstan. In: Groundwater environment in Asian cities: concepts, methods and case studies. Chapter 17, Elsevier Publ., 2015, pp. 383–412.
12. Litvak, R.G., Nemaltseva, E.I., Morris, B.L. Groundwater vulnerability assessment for intermountain valleys using Chu Valley of Kyrghyzstan as example. In: Groundwater and ecosystems. NATO Science Series. Springer. 2006, pp. 107–120.
13. Morris, B.L, Darling, W.G., Gooddy, D.C., Litvak, R.G, Neumann, I., Nemaltseva E.I., Poddubnaia I.V. Assessing the extent of induced leakage to an urban aquifer using environmental tracers: an example from Bishkek, capital of Kyrgyzstan, Central Asia. *Hydrogeology Journal*, 2006, vol. 14, no. 1–2, pp. 225–243.
14. Morris, B.L., Litvak, R.G., Ahmed, K.M. Urban groundwater protection and management: lessons from developing cities in Bangladesh and Kyrghyzstan. In: Current problems of hydrogeology in urban areas, urban agglomerates and industrial centers. NATO Science Series. IV. Earth and Environmental Sciences, 2002, vol. 8. pp. 77–102.