

ЧИСЛЕННАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЧАСТНОГО ВОДОСБОРА ТОКТОГУЛЬСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА.

*Токарев И.В.¹, Глазунов В.Н.², Горев И.В.², Никуличев В.Б.³,
Панов А.И.², Самсонова А.А.³, Кузьмиченок В. А.³*

- 1- Санкт-Петербургское отделение института геоэкологии РАН, Санкт-Петербург.
- 2- Научно-Исследовательский Институт Экспериментальной Физик, РФЯЦ, Саров.
- 3- -Институт водных проблем и гидроэнергетики НАН Кыргызской Республики.

Гидрологические и гидрогеологические исследования, выполненные в рамках проекта КР-1430, продемонстрировали, что водный баланс Токтогульского водохранилища формируется за счет речного стока, а качество воды определяется взаимодействием поверхностного и подземного стока (Савельев, Токарев, *Балансовая...*; Токарев и др., *Исследования...*; Толстихин и др., *Гидрохимия...*, все – настоящий сборник). Основным природным фактором, определяющим возможность накопления необходимого объема воды в водохранилище, является сток р. Нарын. Природным фактором, определяющим изменение качества воды, является растворение эвапоритов и последующий сток воды с повышенной соленостью в водохранилище.

Численная гидрогеологическая модель частного водосбора Токтогульского водохранилища была создана для оценки статей баланса поверхностных вод и реализации Постоянно Действующей Модели (ПДМ).

Анализ природных условий и их схематизация для учета в численной модели

Географические границы области моделирования – частный водосбор Токтогульского водохранилища, ограниченный (Рис. 1):

- с севера – водоразделами хребтов Таласский Ала-Тоо, Суусамыр-Тоо;
- с юга – Кек-Ирим-Тоо, северными отрогами Ферганского хребта и хребтом Бабаш-Ата;
- с запада - хребтом Ат-Ойнок.

Модель включает Кетмень-Тюбинскую котловину в виде прибрежной зоны водохранилища.

Южные склоны Таласского и Суусамырского хребтов широкие, пологие и расчленены на отдельные крупные отроги. В этой части котловины распространены основные объемы осадочных неоген-четвертичных пород, заполняющих речные долины. Эти рыхлые отложения являются водообильными и на участках их распространения формируются основные ресурсы подземных вод.

Северные склоны Кёк-Ирим-Тоо, Ат-Ойнокского и Ферганского хребтов крутые, короткие, сильно расчленены и сложены преимущественно кристаллическими породами. Рыхлые отложения отсутствуют или маломощны, в результате чего южный борт котловины является практически безводным.

Численная реализация. Поскольку область моделирования представляет собой замкнутый водосборный бассейн, то внешние контуры сеточной области реализованы в виде непроницаемой границы – ГУ II рода (поток $Q = 0$, условие Ньюмана).

Положение поверхности Земли описывалось с помощью цифровой модели рельефа, полученной по данным Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

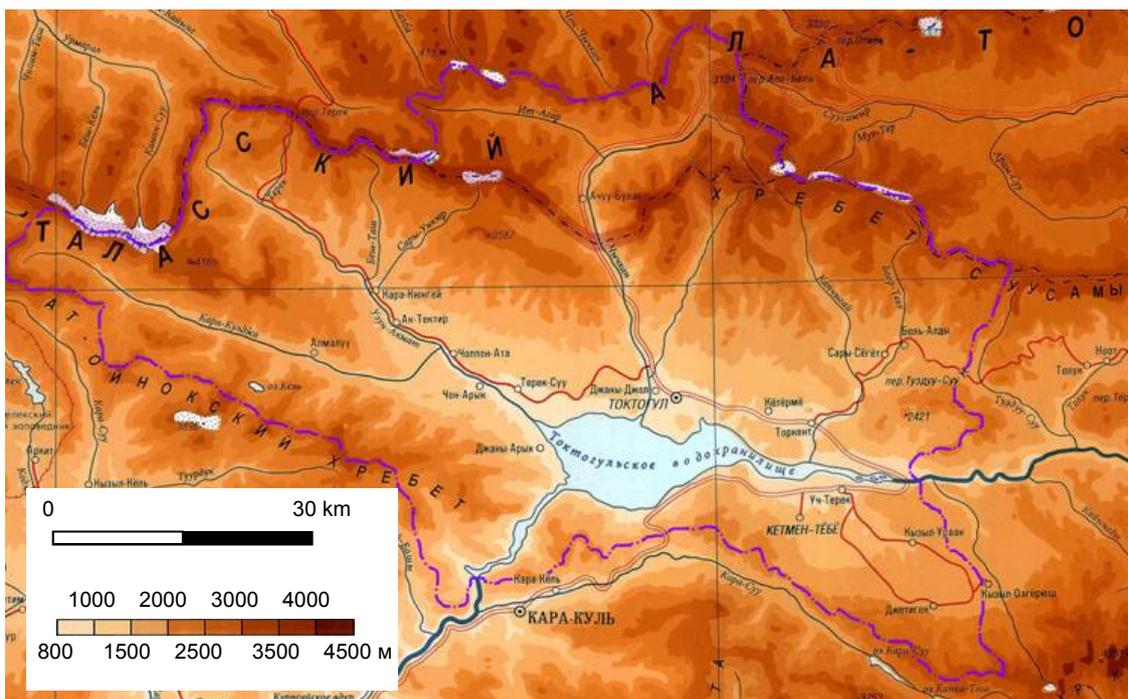
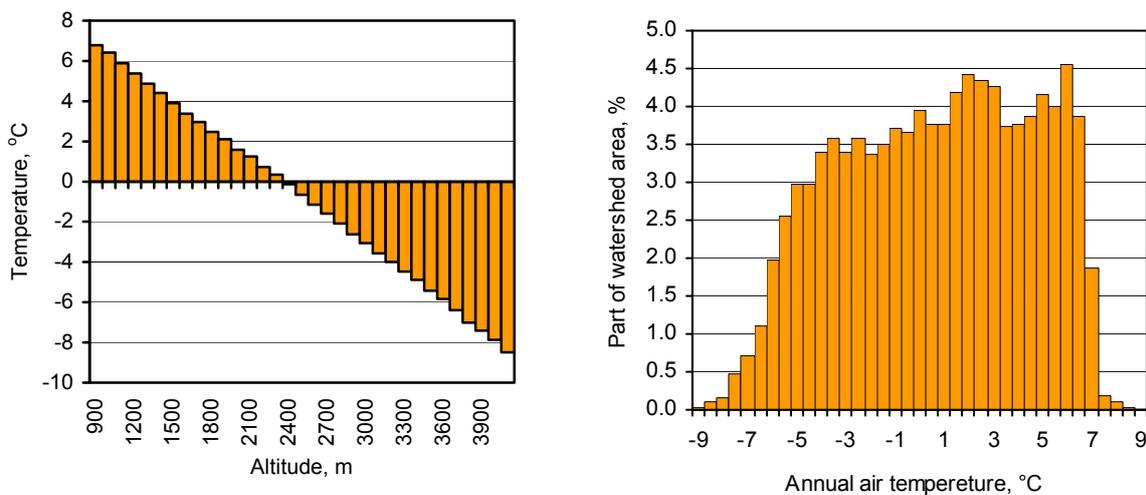


Рис. 1. Географические границы области моделирования.

Климатические факторы. Климат района резко континентальный, засушливый. Для осеннего, зимнего и весеннего периодов характерны западные вторжения воздуха, приносящие основную долю влаги. Летом выражен местный горно-долинный ветер, вследствие чего поступление влаги извне на водосбор резко снижено.

Температура. В результате значительной изменчивости высоты местности имеет место большая разница температур между Кетмень-Тюбинской котловиной на уровне воды в водохранилище и водоразделами (Рис. 2). Эта закономерность отражается на всех статьях водного баланса, каждая из которых имеет ту или иную функциональную зависимость от высоты местности.



а)

б)

Рис. 2. Распределение среднегодовых температур по высоте (а) и диаграмма встречаемости температур (б) (Кузьмиченок, 2008).

Осадки (приходная часть водного баланса). Основная часть водных ресурсов формируется на наветренных склонах хребтов в горах. В пределах Кетмень-Тюбинской котловины в среднем выпадает 250-300 мм осадков в год, в горах объем осадков возрастает до 1200 мм (Рис. 3, 4). С ноября по май выпадает около 80 % осадков, на долю летнего периода приходится 8-10 % осадков (минимум – в августе 3-5 мм).

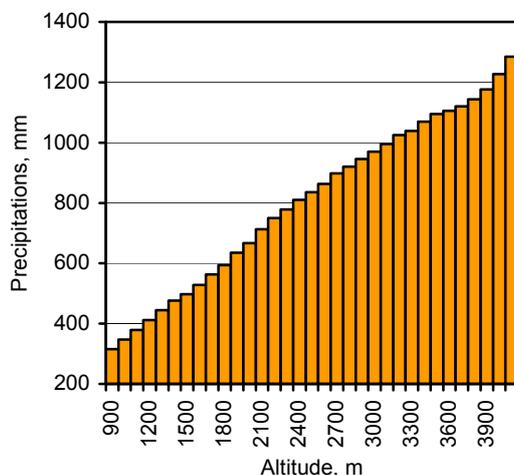


Рис. 3. Распределение годовых сумм атмосферных осадков по высоте (Кузьмиченок, 2008).

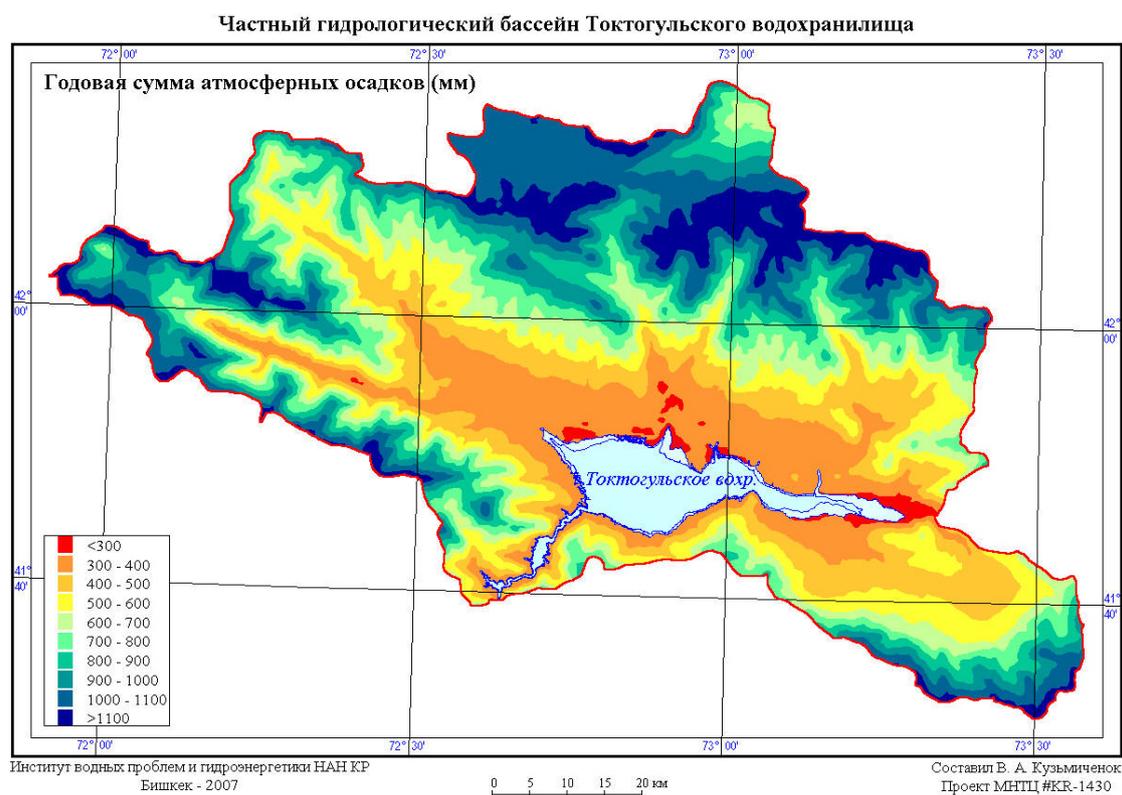


Рис. 4. Распределение годовых сумм осадков (P) в пределах моделируемой области, мм (Кузьмиченок, 2008).

Испарение (расходная часть водного баланса). Величина испарения в каждой отдельной точке определяется, в основном, соотношением величины объема осадков и температуры воздуха. Некоторую долю влияния вносит также экспозиция склонов относительно солнца и их положение относительно преобладающих ветров. В связи с

субширотным расположением хребтов для склонов северной и южной экспозиции рост испарения описывается несколько различными функциями.

Для моделируемой области генеральным трендом является возрастание величины испарения до высот порядка 2400 м (Рис. 5, 6). На больших высотах величина испарения уменьшается в результате снижения среднегодовой температуры (Рис. 2). На высотах до 1800-2000 м испарение почти полностью компенсирует осадки, то есть почти вся влага, выпавшая в виде дождя и некоторой части снега, испаряется.

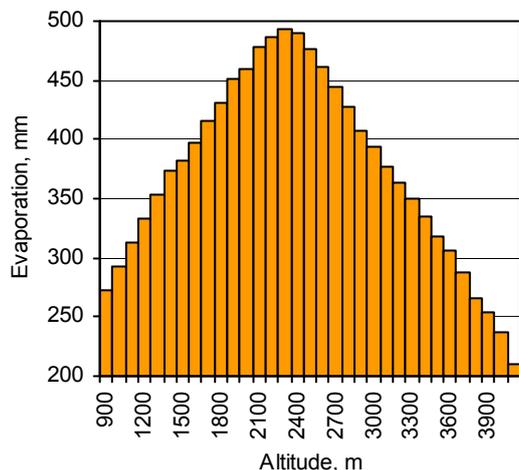


Рис. 5. Распределение годовой величины испарения по высоте (Кузьмиченок, 2008).

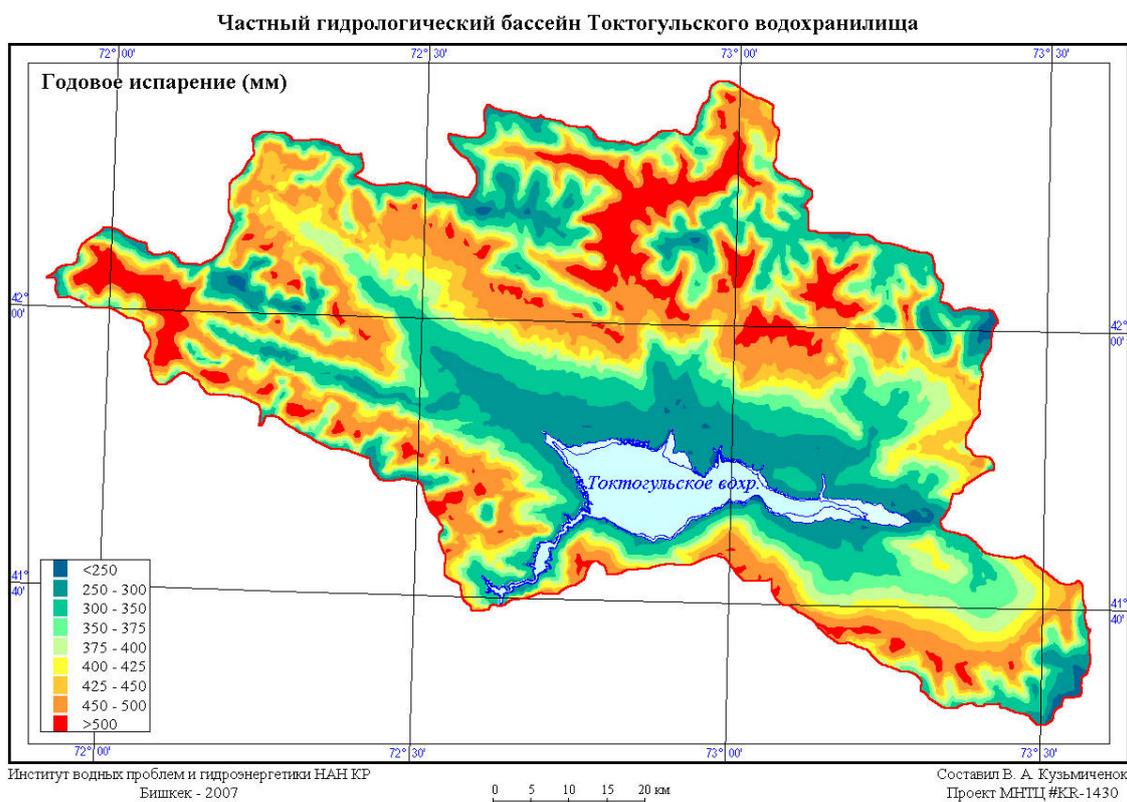


Рис. 6. Распределение годового испарения (ET) в пределах моделируемой области, мм (Кузьмиченок, 2008).

Водохранилище и реки. Водохранилище занимает значительную площадь Кетмень-Тюбинской котловины, имея абсолютную отметку уровня воды от 720 до 903 м над уровнем моря.

Основной питающей артерией водохранилища является р. Нарын, дающая около 85 % притока воды в водохранилище. В пределах моделируемой области выделяются водосборы малых рек, из которых наиболее значимыми являются – Узун-Ахмат, Чычкан и Торкент. Среднемесячные и среднегодовые значения величины речного стока основных рек по данным наблюдений за период 1964-2006 гг. приведены в Табл. 1.

Табл. 1.

Среднемесячный и среднегодовой речной сток в пределах Кетмень–Тюбинской впадины за период 1964-2006 гг., м³/с.

Название реки	Месяц												Среднее за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Узун–Ахмат	9.96	9.06	9.32	23.9	60	78.8	57.8	33	20	15.2	13.3	11.4	28.5
Чычкан + Мал. Чычкан	5.49	4.98	4.9	10.5	31.7	56.8	43.6	22.2	11.1	7.8	6.55	5.82	17.6
Торкент	3.11	3.11	3.28	8.49	22.2	38.1	23.1	8.67	4.41	4.1	3.83	3.32	10.5
Нарын	136	136	152	261	511	819	711	504	286	207	175	147	337

Перепад высот между водоразделами и уровнем воды в водохранилище составляет 2000-3000 м, поэтому все реки имеют горный режим течения.

Численная реализация. Пространственное положение рек в пределах моделируемой области задавалось в соответствии с цифровой моделью рельефа.

Макроизвилистость русел рек (длина изгибов русла реки, превышающих размеры блоков численной модели) описывалась с помощью задания колен. Уклон колен рассчитывается предпроцессором использованного программного обеспечения в ходе подготовки начальных данных к счету, исходя из сеточной аппроксимации цифровой модели рельефа. Для каждого колена геометрия реки в разрезе описывается поверхностью рельефа, от которой отсчитывается параметр «уровень воды» в реке h_{RIV} . Уровень воды в реке определяется как разность между поверхностью рельефа в точке и параметром «высота берегов реки».

Положение дна реки определяется через параметр «глубина реки», величина которого вычитается из h_{RIV} . Толщину донных отложений характеризует параметр, называемый «мощность экрана», со своим параметром «коэффициентом фильтрации».

Цепочка связанных между собой колен объединяется в объект «Река», для которого в любой точке колена можно задать контрольный (проверочный) параметр «Расход реки». Этот параметр представляет собой сумму притока ко всем вышерасположенным коленам реки. Этот параметр в нашем случае определяется исключительно объемом атмосферных осадков, выпадающих в бассейне реки (за вычетом испарения). При калибровке модели

соответствующая величина сравнивалась с данными по реально существующим гидрологическим створам.

Микроизвилистость русел (случай, когда длина изгибов русла реки равна или меньше размеров блоков численной модели) учитывается пользователем в параметре «ширина русла реки».

Для каждой реки задаётся область, называемая «бассейн реки». Фактически эта область является водосбором реки. При задании инфильтрации через предпроцессорную функцию в расчете используются параметры «атмосферные осадки», «испарение» и «коэффициент инфильтрации». Объём атмосферных осадков, выпавших в бассейне реки и не пошедших на испарение или на восполнение ресурсов подземных вод в виде инфильтрации, учитывается в параметре «расход реки».

Связь между поверхностными и подземными водами реализуется с использованием ГУ III рода (поток $Q = f(\Delta h)$ – условие Коши). Учитывая горный характер рек, проницаемость донных отложений задавалась достаточно высокой – $k_f = 0.1-0.3$ м/сут.

При калибровке модели расходы воды, рассчитанные для объекта типа «Река», пересчитывались в слой поверхностного стока w , исходя из площади водосбора соответствующей реки.

Геолого-гидрогеологические условия. Водовмещающие породы в пределах частного водосборного бассейна Токтогульского водохранилища можно разделить на две группы. (Толстихин и др., *Геолого-гидрогеологические...*, настоящий сборник) К первой следует отнести трещиноватые породы, представленные, в основном, изверженными и сильно метаморфизованными образованиями преимущественно докайнозойского возраста. Ко второй относятся рыхлые осадочные породы неогена и четвертичного периода.

Трещиноватые породы характеризуются заметной проницаемостью только в части разреза непосредственно вблизи дневной поверхности, где коэффициенты фильтрации достигают $n \times 10^{-1}$ м/сут. Мощность (толщина) зоны активной трещиноватости, по-видимому, не превышает 150-300 м от поверхности Земли. Эти геологические образования играют роль только проводников.

Пористые породы характеризуются весьма широким разбросом коэффициентов фильтрации от $n \times 10^{-1}$ до первых метров в сутки. Эти геологические образования играют как роль проводников, так и обладают заметными емкостными свойствами.

Все водоразделы в пределах моделируемой площади сложены трещиноватыми породами, поэтому запасы воды на этих площадях существуют только в виде сезонных снегов и ледников. Площадь ледников в пределах частного водосборного бассейна Токтогульского водохранилища пренебрежимо мала, так как составляет менее 0,5 %.

Питание подземных вод происходит как за счет прямой инфильтрации атмосферных осадков, так и за счет поглощения рассредоточенного плоскостного поверхностного стока в среднегорье. Заметную роль играет также подрусловой поток подземных вод, однако данные по изменению расхода рек от верховьев к устьям отсутствуют.

Концептуальная модель формирования подземного стока. Приведенные выше сведения, а также данные, полученные в ходе реализации проекта (Токарев и др., настоящий сборник), позволяют сформулировать концептуальную модель формирования подземного стока, которая представлена на Рис. 7.



Рис. 7. Концептуальная модель формирования подземного стока в бассейне Токтогульского водохранилища.

Зона формирования ресурсов воды находится в средне- и высокогорье, основные запасы подземных вод воды накапливаются за счет таяния снега и весенних дождей, так как максимум осадков имеет место в феврале-апреле. Переход запаса воды из снега и дождей в поверхностный и подземный сток происходит в конце апреля-мая.

В среднегорье в прибортовых частях долин находится зона прямого поглощения атмосферных осадков и перехода поверхностного стока в подземный. В пределах Кетьмень-Тюбинской котловины на вышерасположенных участках долин пополнения водных ресурсов не происходит из-за относительно малого объема осадков и высокой испаряемости. Однако, именно эта часть геологической структуры Кетьмень-Тюбинской котловины содержит основную часть запасов подземных вод. Разгрузка подземных вод происходит в местную речную сеть и Токтогульское водохранилище.

Реальное распределение коэффициентов фильтрации, гравитационной и упругой емкости отложений в отдельных гидрогеологических структурах определяет величину задержки поступления атмосферных осадков с водосборной площади в речную сеть по отношению к периоду снеготаяния.

В численной модели ледниковое питание рек не учитывалось, так как величина горного оледенения в частном водосборном бассейне водохранилища не превышает 0.4 %.

Результаты расчетов на модели Snow-melt Run-off Model (Савельев, Токарев, настоящий сборник) позволяют принять, что питание подземных вод зависит от динамики таяния сезонных снегов и характеризуется изменяющимся во времени коэффициентом инфильтрации k_e . Эти изменения учитывались при построении нестационарной модели.

Коэффициенты фильтрации вмещающих пород задавались по данным опытных работ (северный борт Кетьмень-Тюбинской котловины) и исходя из экспертных оценок (горное обрамление).

Инфильтрация (расходная часть водного баланса). Объем инфильтрационного питания подземных вод является довольно сложной функцией, в параметры которой входят:

– названные выше основные метеорологические показатели – объемы осадков и испарения;

– вспомогательные метеорологические показатели – тип осадков, распределение их по сезонам года, ветровая обстановка, темп весеннего перехода температуры через ноль (дружность весны) и т.п.;

– климатические факторы, в первую очередь – промерзание грунтов в холодное время года;

– геологические параметры – крутизна склонов, гранулометрический состав почвенного субстрата, тип и величина проницаемости подстилающих горных пород, мощность зоны аэрации и другие менее значимые.

В результате наличия большой совокупности влияющих факторов параметр инфильтрации не мог быть определен в ходе проекта напрямую экспериментально.

Экспертная оценка интенсивности инфильтрации может быть сделана исходя из общих соображений, а также из данных об изотопном составе подземных вод. В соответствии с этими данными, нижняя граница области инфильтрационного питания подземных вод расположена, в среднем, начиная от высот около 1800-2000 м. К этой же высотной зоне наблюдается существенное уменьшение мощности рыхлых отложений, заполняющих речные долины в частном водосборном бассейне Токтогульского водохранилища.

В горных странах верхняя граница области питания подземных вод, как правило, располагается на высотах, где крутизна поверхности существенно увеличивается, что создает условия для полного перехода осадков в поверхностный сток. Кроме того, обычно сказывается наличие подстилающего субстрата, представленного низко трещиноватыми разностями кристаллических пород, также уменьшает интенсивность инфильтрационного питания. Наконец в холодное время года значимое влияние оказывает промерзание почв и грунтов.

В случае частного водосбора Токтогульского водохранилища водоразделы расположены на высотах более 2700 м и имеют преимущественно уплощенные вершины (Рис. 8). Поэтому скатывание воды с водоразделов происходит относительно медленно. Соответственно, область инфильтрационного питания в пределах моделируемой области простирается вплоть до водоразделов.

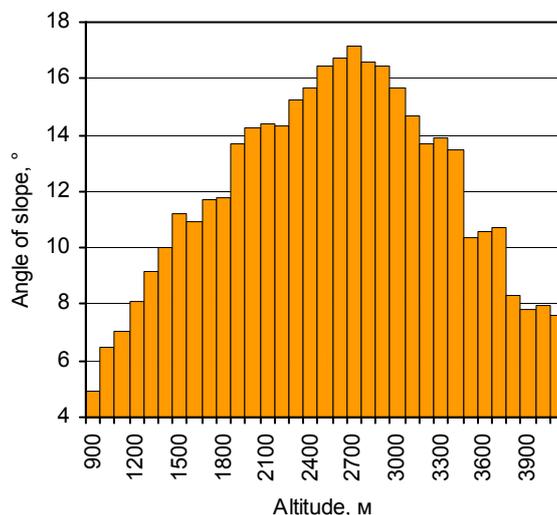


Рис. 8. Распределение крутизны склонов в зависимости от высоты местности (Кузьмиченок, 2008).

Численное описание питания подземных вод. Распределение годовых объемов осадков и испарения в пределах моделируемой области оценивалось согласно цифровой (статистической) модели увлажнения Кыргызстана, построенной по данным наблюдений на метеостанциях (Кузьмиченок, 2008). Поскольку основным параметром, контролирующим осадки и испарение, является высота местности, то карты годовых объемов осадков и

испарения в целом повторяют карту рельефа. В численной модели использовалась сеточная аппроксимация распределений годовых объемов осадков и испарения.

Объем инфильтрационного питания в каждом сеточном узле рассчитывался исходя из соотношения:

$$\varepsilon = k_{\varepsilon} \times P,$$

где ε – слой инфильтрационного питания, мм/год; k_{ε} – коэффициент инфильтрации, доли единицы; P – слой осадков в данной точке моделируемой области, мм/год.

Калибровка модели выполнялась, исходя из балансового уравнения:

$$P = w + ET + \varepsilon = w + (1 - k_{\varepsilon}) \times P + k_{\varepsilon} \times P, \quad (1)$$

где w – слой поверхностного стока, мм/год; ET – слой эвапотранспирации (испарения и транспирации растениями), мм/год. В рассматриваемом случае испарение это $E = ET$, так как слой транспирации растениями оказывается незначительным (Кузьмиченок, 2008).

Пространственное распределение величины P задавалось, исходя из цифровой модели увлажнения частного водосборного бассейна Токтогульского водохранилища (Кузьмиченок, 2008).

При решении нестационарной задачи использовались данные о годовом ходе осадков. Характерный вид графиков распределения осадков в годовом разрезе времени для станций, расположенных на высотах около 2000-2100 м, приведен на Рис. 9.

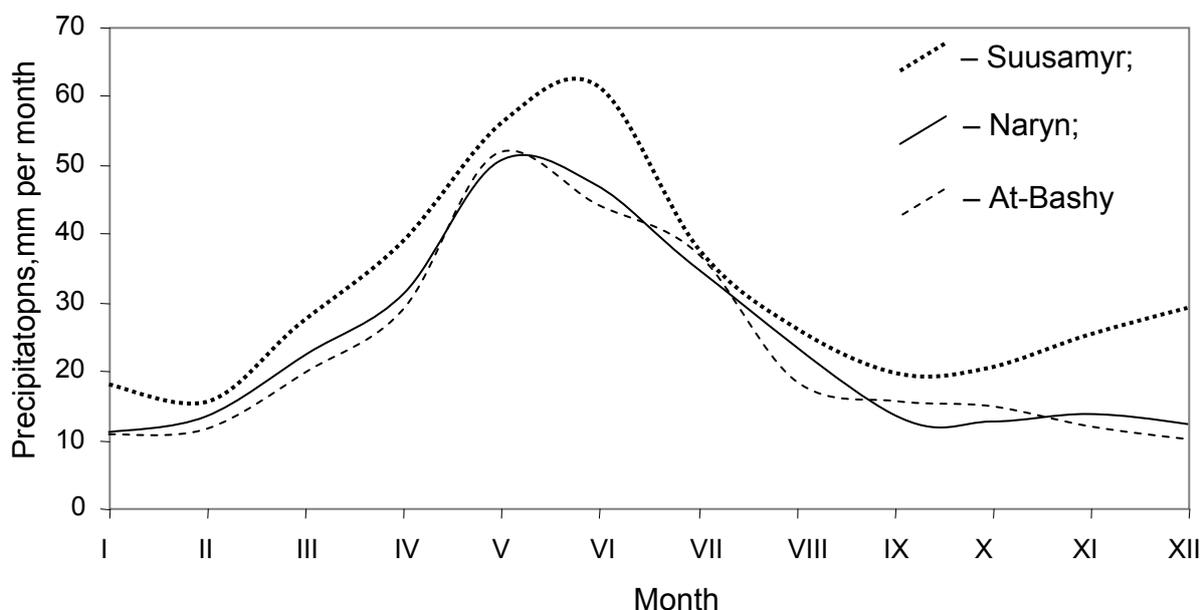


Рис. 9. Среднемесячные осадки по данным метеостанций в период 1964-2000 гг. (данные Кыргызгидромета).

Проверочная величина w рассчитывалась исходя из данных о размерах водосборных бассейнов отдельных рек, определяемых по цифровой модели рельефа SRTM, а также из наблюдений за стоком рек на гидропостах:

$$w = Q_{RIV} / S_{RIV},$$

где Q_{RIV} и S_{RIV} – измеренный расход и площадь водосбора соответствующей реки.

Величина k_{ε} подбиралась в ходе калибровки модели, причем в качестве контролирующих (калибровочных) параметров выступали модельные значения w^{MOD} , ET^{MOD} и P^{MOD} , которые вычислялись исходя из численного решения.

Геометрическое описание области моделирования. Создание модели рельефа выполнено по данным SRTM (Рис. 10).

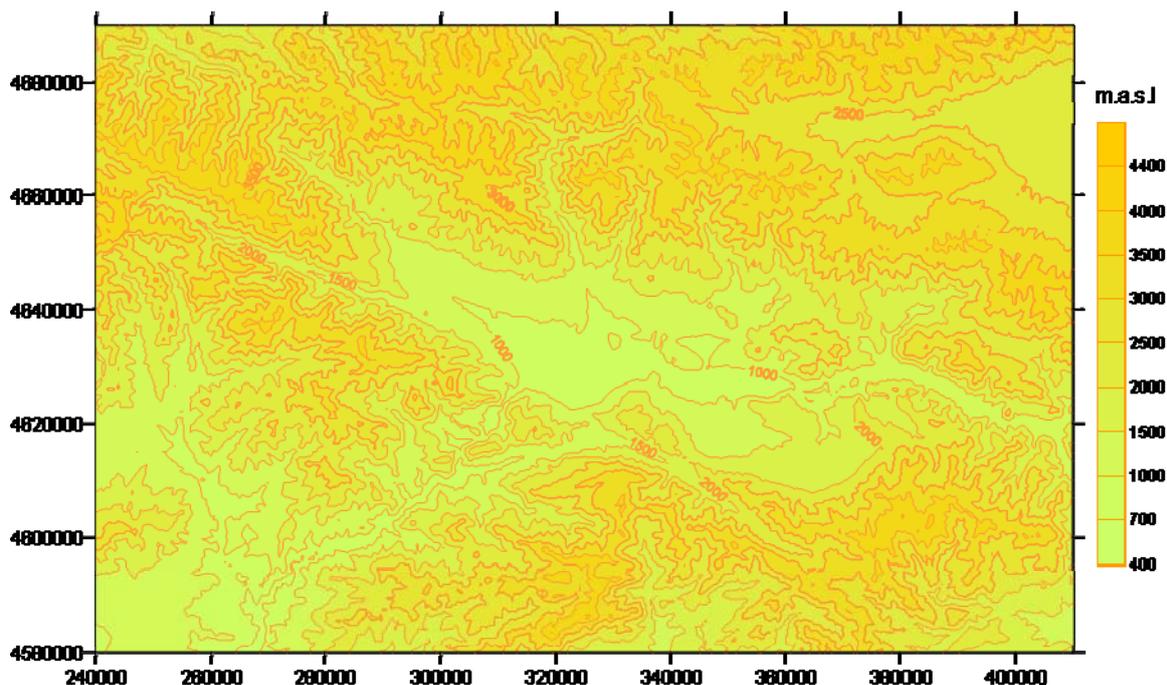


Рис. 10 Рельеф поверхности Земли в пределах водосборной площади Токтогульского водохранилища (данные SRTM).

Далее выполнялись вспомогательные построения. Разработанная на предыдущих этапах проекта концепция предусматривает аппроксимацию геологической среды шестью слоями:

- три верхних слоя отвечают пористым коллекторам; в горах это аллювиально-делювиальные отложения, в долинах – рыхлые неогеновые и четвертичные отложения, заполняющие Кетьмень-Тюбинскую котловину и долины рек Узун-Ахмат, Чычкан, Торкен и Саргата;
- три нижних слоя соответствуют зонам активной, затухающей и низкой трещиноватости кристаллических пород горного обрамления.

В пределах акватории водохранилища для аппроксимации геологической среды использована другая идентификация слоев:

- два верхних слоя будут использованы для описания рыхлых наносов, сформировавшихся после заполнения водохранилища;
- три средних будут отвечать рыхлым неогеновым и четвертичным отложениям;
- один нижний соответствовать кристаллическим породам ложа водохранилища.

Данные по геометрии отдельных пластов в пределах моделируемой области весьма скудны. При анализе архивной информации описание геологического разреза в необходимом масштабе найдены только для Кетьмень-Тюбинской котловины. В связи с этим решено дополнить недостающий массив данных исходя из следующих соображений. Мощность (толщина) рыхлых отложений должна возрастать в направлении от водоразделов к долинам рек и Кетьмень-Тюбинской котловине. Характер роста имеет ярко выраженный нелинейный вид, поэтому для реконструкции поверхностей раздела предложено использовать зависимость следующего вида:

$$\bar{Z} = Z - (C_1 \sqrt{Z} + C_2)^{Z_{MAX}},$$

$$C_1 = \frac{m(Z_{MAX}) - m(Z_{MIN})}{\sqrt{Z_{MAX}} - \sqrt{Z_{MIN}}},$$

$$C_2 = m(Z_{MAX}) - C_1 \sqrt{Z_{MIN}},$$

где \bar{Z} – вычисленная абсолютная отметка подошвы модельного пласта, м; Z – абсолютная отметка подошвы выше залегающего модельного пласта (для верхнего пласта – это отметка рельефа), м; $m(Z_{MAX})$, $m(Z_{MIN})$ – мощность (толщина) пласта на водоразделе и на урезе водохранилища, соответственно, м.

Предложенная математическая модель позволяет также вычислять увеличение толщины зоны активной трещиноватости кристаллических пород по направлению от долин к водоразделам и задавать соответствующие мощности модельных «пластов». В пределах Кетмень-Тюбинской котловины расчетные отметки корректировались, исходя из имеющихся сведений о геометрии залегания неогеновых и четвертичных пород по данным бурения скважин.

На этапе подготовки данных к счету предпроцессором находилась сеточная аппроксимация рельефа и разделяющих поверхностей.

Задавались внешние непроницаемые границы моделируемой области.

Проводилась трассировка рек – Узун-Ахмат (Usun-Akhmat), Чычкан (Chychkan + Small Chychkan), Торкент (Torkent) в автоматическом режиме с последующей корректировкой вручную. При этом производится проверка положения рек в пространстве и соответствие уровней воды в реках данным SRTM и топографическим картам. Данные об уровнях воды в реках использованы также для калибровки модели.

Выделялись водосборы названных рек, временных водотоков и сухих долин. Выделение проводилось в автоматическом режиме с корректировкой вручную.

Рассчитывались площади водосборов S_{RIV} для рек Узун-Ахмат (Usun-Akhmat), Чычкан (Chychkan + Small Chychkan), Торкент (Torkent), а также площади временных водотоков и сухих долин.

Параметрическое наполнение модели, задание граничных условий

Выделение зон неоднородности по параметрам производилось вручную через интерфейс программы с учетом всех полученных ранее данных и в соответствии с принятой схематизацией. Выделенные зоны неоднородности аппроксимировались на сеточную разбивку предпроцессором. Например, сеточная аппроксимация пространственного распределения слоя осадков (P) испарения (E) выполнялась на основании распределений, представленных на Рис. 4 и 6.

Согласно балансовой модели увлажнения (Кузьмиченок, 2008), поверхностный сток w представляет собой разницу между осадками и испарением:

$$w = P - E.$$

В численной гидрогеологической модели частного водосбора Токтокульского водохранилища величина w (часть слоя осадков, идущая на поверхностный сток) принята в качестве приходной части баланса

$$P^{МОД} = w.$$

Последнее сделано для того, чтобы исключить необходимость моделирования испарения. В этом случае атмосферное питание в модели распадается на прямой поверхностный сток в реки и инфильтрацию:

$$P^{МОД} = w^{МОД} + \varepsilon^{МОД} = (1 - k_{\varepsilon}) \times P^{МОД} + k_{\varepsilon} \times P^{МОД},$$

где $w^{МОД}$ – модельный слой поверхностного стока, мм/год; $\varepsilon^{МОД}$ – модельный слой инфильтрационного питания подземных вод, мм/год; k_{ε} – коэффициент инфильтрации.

В каждой расчетной точке слой осадков, идущий в приходную часть баланса в модели частного водосбора Токтокульского водохранилища, – это разница между осадками и испарением:

$$P^{МОД} = P - E = w,$$

где w – поверхностный сток, согласно статистической (балансовой) модели (Кузьмиченок, 2008).

В этом случае атмосферное питание в модели распадается на прямой поверхностный сток в реки и инфильтрацию. Упрощенно суммарный водный баланс модели описывается как:

$$P^{МОД} = w^{МОД} + \varepsilon^{МОД} = (1 - k_{\varepsilon}) \times P^{МОД} + k_{\varepsilon} \times P^{МОД},$$

где $w^{МОД}$ – модельный слой прямого поверхностного стока, мм/год; $\varepsilon^{МОД}$ – модельный слой инфильтрационного питания подземных вод, мм/год; k_{ε} – коэффициент инфильтрации.

Пространственное распределение поверхностного стока $w^{МОД}$ рассчитывался в ходе получения модельного решения и используется при калибровке. Для этого модельный слой поверхностного стока $w^{МОД}$ сравнивалась с величиной, полученной при создании статистической модели увлажнения водосборного бассейна Токтогульского водохранилища (Кузьмиченок, 2008).

Граничные условия на реках определялись в виде условия третьего рода (ГУ III рода, условие Коши). Это условие определяется как зависимость перетока из/в реку от перепада уровней/напоров, мощности и коэффициента фильтрации экрана в ложе реки – k_f . В пределах моделируемой области все реки имеют горный характер, поэтому связь с реками по определению должна быть хорошей. В связи с этим, начальные значения коэффициента фильтрации донных отложений принимались равными $k_f = 1$ м/сут.

Задание граничного условия на водохранилище выполнялось также с помощью ГУ III рода (условие Коши), модифицированного специальным способом для задания уровня воды в водохранилище. Сложность программной реализации этой границы состояла в том, что уровень воды в водохранилище (H_{WSR} – water table in water-storage reservoir) зависит от объема накопленной воды (V_{WVR} – water volume in reservoir). В свою очередь, объем накопленной воды зависит от сочетания двух балансовых составляющих – стока р. Нарын и малых рек (Q_{RIV}) и выпуска воды из водохранилища (Q_{RD} – reservoir discharge):

$$H_{WSR} = f(V_{WVR}),$$

В свою очередь, объем накопленной воды зависит от сочетания двух балансовых составляющих – стока и выпуска воды из водохранилища (Q_{RD} – reservoir discharge). Сток воды в водохранилище определяется преимущественно вкладом р. Нарын и малых рек (Q_{RIV}). В меньшей степени баланс водохранилища определяется плоскостным стоком (поверхностная составляющая Q_{SURF}) и разгрузкой подземных вод непосредственно в водохранилище (Q_{GW}). Однако последние две величины чрезвычайно важны при моделировании изменения качества воды в водохранилище. Таким образом, объем воды, накопленной в водохранилище, определяется соотношением статей баланса, осредненных на промежутке времени t :

$$f(V_{WVR}) = (Q_{RIV} + Q_{SURF} + Q_{GW} - Q_{RD}) \times t.$$

Соотношение между уровнем воды в водохранилище H и объемом накопленной воды V_{WVR} было известно ранее, а также уточнялось в ходе выполнения батиметрической и топографической съемок по заказу Дирекции Каскада Токтогульских ГЭС (Рис. 10, *Уточнение...*, 2010 ; Шабунин и др., *Расчет...*, настоящий сборник):

$$V_{WVR} = 4.7735 \times 10^{-9} \times H^6 - 2.3103 \times 10^{-5} \times H^5 + 4.6499 \times 10^{-2} \times H^4 - 49.813 \times H^3 + 29955.96 \times H^2 - 9588308 \times H + 1276190130 \quad (1)$$

при точности аппроксимации $R^2 = 0.999993$.

Для использования в численной модели уравнение (1) решалось относительно параметра H , так как величины Q_{RIV} , Q_{SURF} и Q_{GW} находились на решении, а Q_{RD} задавались пользователем, исходя из данных Дирекции Каскада Токтогульских ГЭС. Решение уравнение (1) выполнялось итерационным способом в ходе подготовки данных предпроцессором. На основании найденных решений составлялась таблица $H \div V_{WVR}$ с шагом примерно 1 м, после чего строилась функция аппроксимации, использовавшаяся в ходе решения.

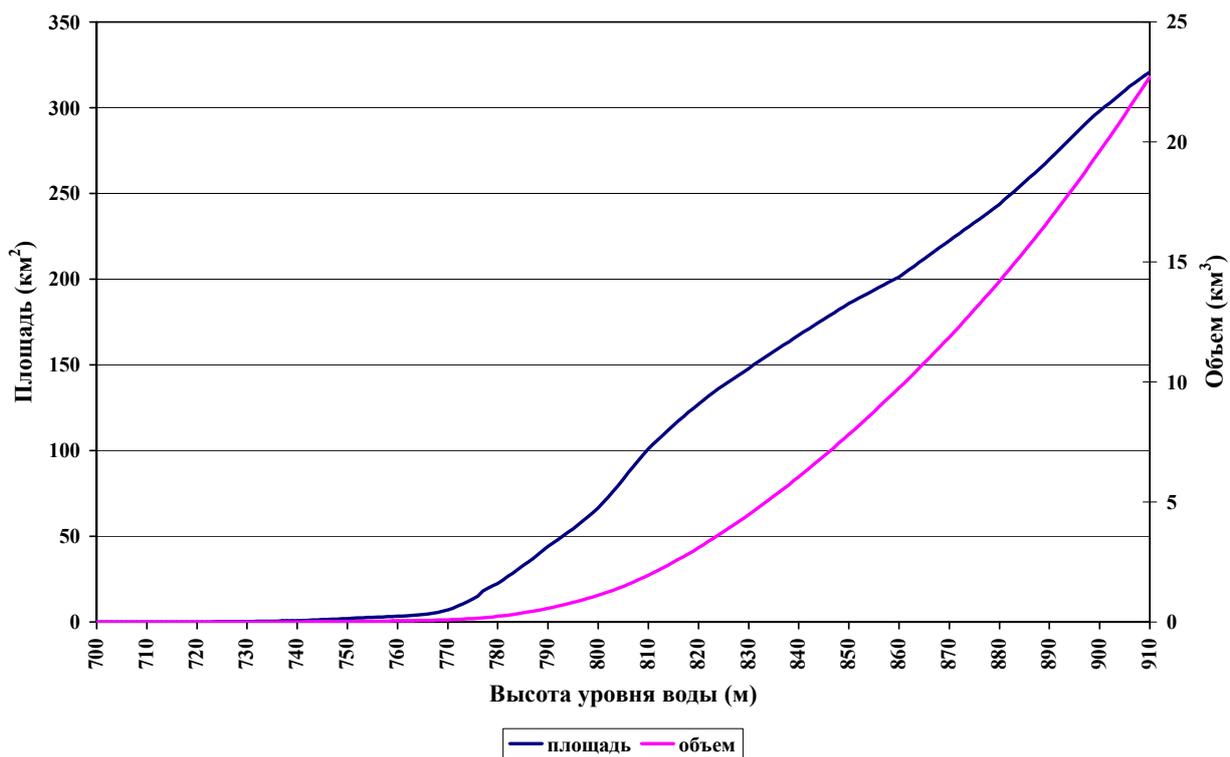


Рис. 11. Результаты измерений уровней и расчета объема воды, и площади зеркала Токтогульского водохранилища.

Фильтрационные параметры. Одним из наиболее трудных вопросов при задании параметров и последующей калибровке модели является оценка фильтрационных параметров пластов. Для исследуемой площади архивные сведения о проведении опытно-фильтрационного опробования наличествуют в небольшом количестве (Табл. 2). При этом следует обратить внимание на то, что скважины характеризуют только рыхлые отложения Кетьмень-Тюбинской котловины, так как их бурили с целью эксплуатации подземных вод для водоснабжения. Скважины, которые могли бы охарактеризовать подземные воды в пределах горного обрамления (площадей развития трещиноватых кристаллических пород) отсутствуют.

Модель рельефа, данные о фильтрационных параметрах позволили выполнить разбивку моделируемой области на фрагменты (Рис. 12). Собственно аппроксимация модельной области сеточной разбивкой представлена на (Рис. 13). Плотность сеточной разбивки назначалась таким образом, чтобы в пределах распространения рыхлых отложений, которые к тому же лучше охарактеризованы фильтрационными параметрами, модельное представление среды было наиболее детальным.

Табл. 2 Результаты опробования скважин на воду в Кетмень-Тюбинской котловине (данные Кыргызской комплексной экспедиции).

№ скв абс. отм.	Местоположение скважины,	Глубина бурения, (Интервалы опробования), м	Литология водовмещающих пород	Геологи- ческий индекс	Результаты опытно- фильтрационных работ				Формула макрокомпонентного состава, % мг-экв/л
					H ¹ , м	Q ² , л/с	S ³ , м	K _ф ⁴ , м/сут	
<u>9</u> 920	1,2 км. З с. Ташалыш, 1,2 км. СВ тригопункта с отм. 1094,5 м.	300/(116-140) (232-282)	галечник, конгломераты, песчаники, гравелиты	Q _{II-IV} N ₂ -Q ₁	22,7	5	1,25	9,1	M _{0,4} <u>SO₄46 HCO₃42 Cl10</u> <u>NO₃2</u> Ca35 Mg34 Na30 K1
<u>10</u> 1150	2 км. ЮЗ от с. Саргата, 0,75 км. С от высоты с отм. 1164,3 м.	296/(148-228)	гравелиты, песчаники	N ₂ -Q ₁	15,5	1,8	13,3	0,3	M _{0,75} <u>SO₄57 HCO₃32 Cl19</u> <u>NO₃2</u> Mg39 Ca31 Na28 K2
<u>1788 (11)</u> 1420	100 м. от С окраины с. Бельалды, 0,6 км. СЗ от высоты с отм. 1551,5 м.	250/(149-161), (230-239)	гравелиты, алевролиты, песчаники, алевролиты	N ₂ -Q ₁	19,9	2,5	1,7	5,6	M _{0,57} <u>SO₄48 HCO₃42 Cl18</u> <u>NO₃2</u> Ca41 Na33 Mg25 K1
<u>1795 (8)</u> 942	1450 м. ЮВ высоты с отм. 952,9, 1550 м. В высоты с отм. 925,7 м.	200/(147-178)	галечные, песчано- гравийные отложения	aQ _{II-III}	10,1	2,8	2,5	0,87	M _{0,4} <u>SO₄43 HCO₃42 Cl12</u> <u>NO₃3</u> Na48 Ca36 Mg12 K4
<u>1819 (5)</u> 976	ЮВ окраина с. Уста-Сай в долине р. Узун-Ахмат, в 850 м. З высоты с отм. 956,8 м.	172/(130-145)	песчаники, конгломераты	N ₂ -Q ₁	+2,4	1,0	13,85	0,36	M _{0,46} <u>SO₄70 Cl19 HCO₃11</u> Na54 Mg23 Ca21 K2
<u>1935 (1)</u> 1220	Урочище Джерголот, 2,5 км ЮЗ р. Узун-Ахмат, 1,7 км З высоты 1316,1 м, 0,35 км ЮЗ высоты 1338,9 м.,	250/(203-239)	гравелиты	N ₂ -Q ₁	35	0.15	102	0.005	M _{1,12} <u>SO₄69 Cl18 HCO₃13</u> Na58 Ca20 Mg15 K7

№ скв абс. отм.	Местоположение скважины,	Глубина бурения/ (Интервалы опробования), м	Литология водовмещающих пород	Геологи- ческий индекс	Результаты опытно- фильтрационных работ				Формула макрокомпонентного состава, % мг-экв/л
					H ¹ , м	Q ² , л/с	S ³ , м	K _ф ⁴ , м/сут	
<u>1940 (2)</u> 1056	600 м С-З окраины с. Чолпон-Ата, 1,1 км южнее высоты с отмет. 1254,1м.	200/(140-191)	гравелиты, конгломераты	N ₂ -Q ₁	11,3	2,5	15,7	0,54	M _{1,04} <u>SO₄ 60 HCO₃ 27 Cl 18</u> <u>NO₃ 9</u> Ca 67 Na 16 Mg 15 K 2
<u>1953 (3)</u> 1362	СВ окраина с. Мазарсу. 950 м. ЮЗ высоты с отметкой 1485,9 м.	261/(197-236)	конгломераты, песчаники	N ₂ -Q ₁	22,3	0,8	1,09	2,67	M _{1,01} <u>SO₄ 65 HCO₃ 17 Cl 16</u> <u>NO₃ 1</u> Na 54 Mg 23 Ca 20 K 2
<u>1954 (4)</u> 1327	С-СВ окраина с. Мазарсу, 950 м. ЮВ высоты с отм. 1527,1 м.	248/(163-178)	конгломераты	N ₂ -Q ₁	59,5	0,1	43,8	0,008	M _{1,01} <u>SO₄ 68 HCO₃ 17 Cl 15</u> Na 62 Ca 21 Mg 14 K 3
<u>1979 (12)</u> 1624,5	2,3 км. СВ от тригопункта с отм. 1653,6, 1,75 км. ЮВ от высоты с отм. 1618 м	180/(145-172)	конгломераты, гравелиты, алевролиты	N ₂ -Q ₁	50,5	3,0	1,2	7,8	M _{0,98} <u>HCO₃ 71 SO₄ 25 Cl 3</u> <u>NO₃ 1</u> Ca 44 Na 35 Mg 19 K 2
<u>1983 (14)</u> 1673	0,45 км. от С окраины с. Чалдыбар, в 2,75 км. СЗ от высоты с отм. 1802,7 м.	200/(162-181)	валунно-гравийно- галечные отложения	aQ _{II-IV}	22,5	2,3	5,4	0,21	M _{0,24} <u>HCO₃ 78 SO₄ 10 Cl 7</u> <u>NO₃ 5</u> Ca 75 Mg 17 Na 6 K 2
<u>1991 (13)</u> 1618	0,5 км. ЮВ окраины с. Чаштюбе, 2 км. З высоты с отм. 1764,4 м.	200/(162-193)	конгломераты, гравелиты, песчаники	N ₂ -Q ₁	+0,9	2,5	26,4	0,32	M _{0,81} <u>SO₄ 40 HCO₃ 38 Cl 20</u> <u>NO₃ 2</u> Na 41 Mg 40 Ca 19
<u>2003 (15)</u> 1847	ЮЗ части с. Озгоруш, 0,25 км. СЗ высоты с отм. 1864,1 м.	235/(145-171)	валунно-галечники	apQ _{III-IV}	53.95	3.3	3.85	0.55	M _{0,21} <u>HCO₃ 74 SO₄ 10 Cl 10</u> <u>NO₃ 6</u> Ca 65 Mg 25 Na 11 K 2

№ скв абс. отм.	Местоположение скважины,	Глубина бурения/ (Интервалы опробования), м	Литология водовмещающих пород	Геологи- ческий индекс	Результаты опытно- фильтрационных работ				Формула макрокомпонентного состава, % мг-экв/л
					H ¹ , м	Q ² , л/с	S ³ , м	K _ф ⁴ , м/сут	
<u>2500 (7)</u> 976	800 м. СВ окраины г. Токтогул, в 1,2 км. Ю высоты с отм. 1067,4 м.	250/(184-238)	гравелиты	N ₂	47,1	3,8	3,9	4,0	M _{1,0} <u>SO₄ 79 HCO₃ 16 Cl 2</u> Ca55 Mg35 Na10 K3
<u>2501 (20)</u> 982	3,05 км. СЗ высоты с отм. 1028,1 м., 0,45 км. СВ высоты с отм. 945,5 м.	250/(166-177), (210-233)	гравелиты, песчаники	N ₂ -Q _I	66,5	1,5	22,0	0,2	M _{1,1} <u>SO₄ 53 Cl 32 HCO₃ 15</u> Na60 Ca23 Mg17
<u>2503 (17)</u> 908	2,15 км. от г. Токтогул, 2,65 км. СВ тригопункта с отм. 1088 м.	100/(27-31), (48-63), (74-80)	песчано-гравийные отложения	aQ _{II-IV}	3,44	23,1	2,55	8,1	M _{0,85} <u>SO₄ 41 Cl 41 HCO₃ 15</u> <u>NO₃ 3</u> Ca46 Na43 Mg11
<u>2503(17A)</u> 907	2,5 км. от З окраины г. Токтогул, 2,6 км. СВ от тригопункта с отм. 1088 м.	25/(14-24)	валунно-галечник с песчно-гравийным заполнителем	aQ _{IV}	2,65	14,8	2,89	21,3	M _{0,31} <u>HCO₃ 83 SO₄ 10 NO₃ 4</u> <u>Cl 3</u> Ca67 Mg23 Na9 K1
<u>2504 (18)</u> 935	Левый берег р. Чычкан, 3,3 км. ЮВ тригопункта с отм. 1320 м.	58/(22-38)	гравелиты, песчаники	N ₂ -Q _I	3,35	7,8	11,37	3,1	M _{0,17} <u>HCO₃ 75 Cl 12 SO₄ 10</u> <u>NO₃ 3</u> Ca60 Mg30 Na9 K1
<u>2505 (19)</u> 1020	Левый берег р. Бала-Чычкан, 0,9 км. С с. Емчек, 1,45 км. СВ от высоты с отм. 994,4 м.	72/(21-27), (40-46), (62-65)	песчаник	N ₂ -Q _I	3,24	3,8	2,15	9,2	M _{0,17} <u>HCO₃ 75 SO₄ 11 Cl 10</u> <u>NO₃ 4</u> Ca59 Mg31 Na9 K1

1 – глубина до уровня воды от поверхности Земли, знак «+» означает, что уровень устанавливается

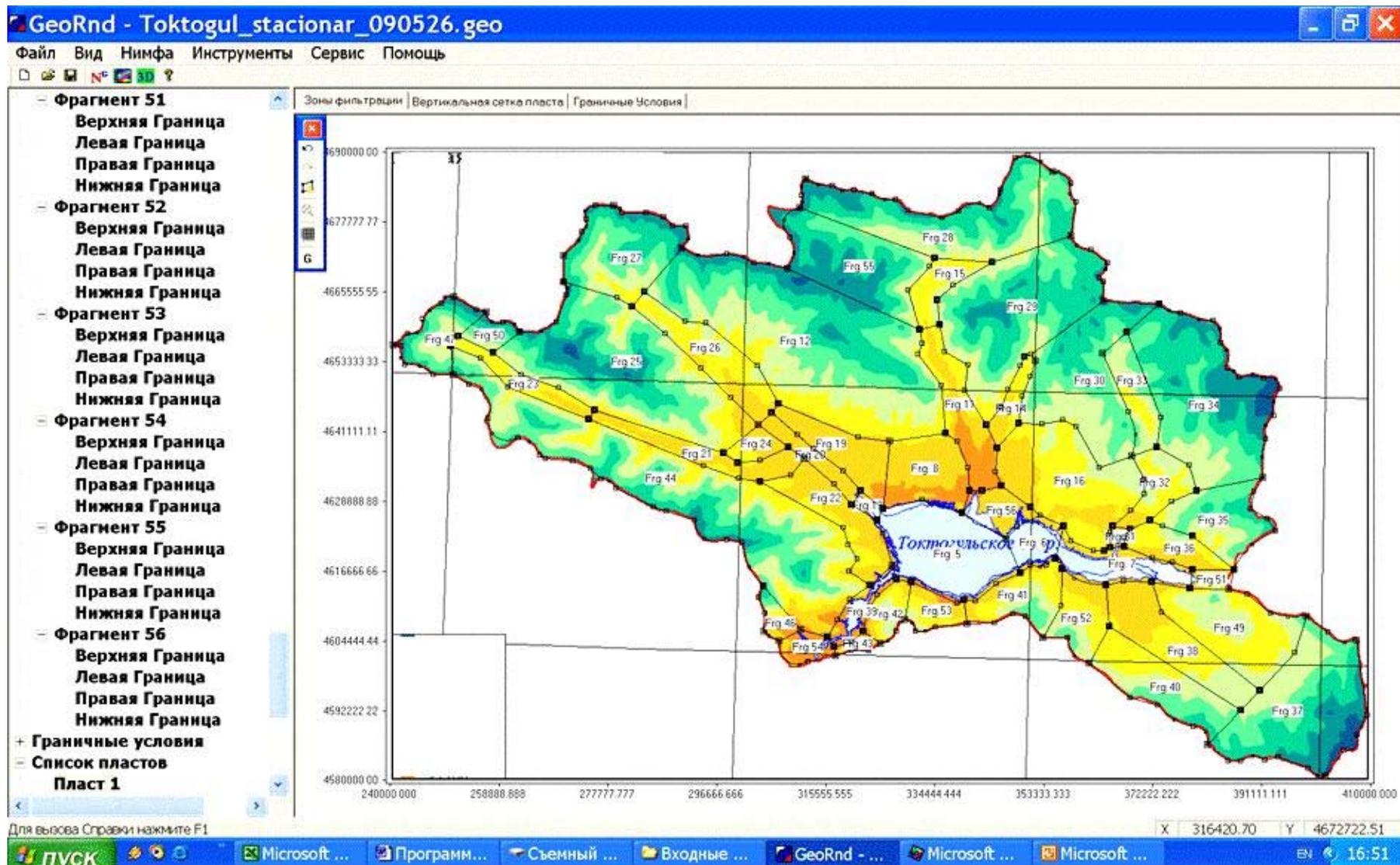


Рис. 12. Представление площади водосбора Токтогульского водохранилища фрагментами.

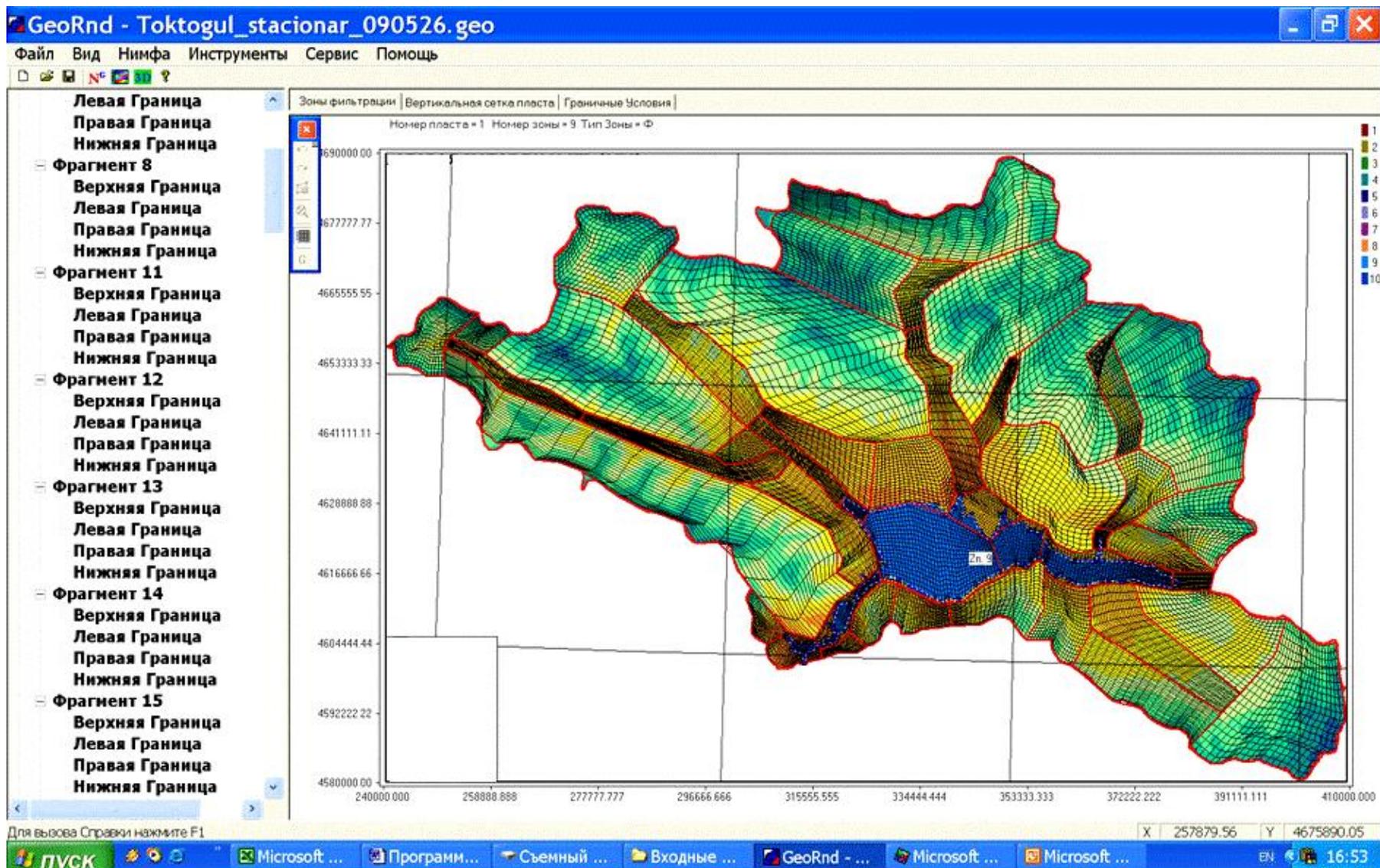


Рис. 13. Сеточная аппроксимация площади водосбора Токтогульского водохранилища

Калибровка модели

Расчет фильтрации в стационарной постановке. Расчет насыщено-ненасыщенной фильтрации в стационарной постановке выполнялся с целью калибровки параметров проницаемости (коэффициентов фильтрации) и проверки баланса модели. При калибровке сравнивался ряд расчетных модельных величин с их значениями, оцененными по данным наблюдений.

1. Проверка по средним расходам рек. Рассчитывался модельный объем стока по каждой реке, для чего суммировались расходы воды со всех колен:

$$Q_{RIV}^{МОД} = \sum Q_i^{МОД} .$$

Результаты моделирования сравнивались с исходными данными (Табл. 1).

2. Проверка по пространственному распределению слоя поверхностного стока $w^{МОД}$. Известна пространственная аппроксимация поверхностного стока $w^{КУЗЬМИЧ}$, построенная с учетом данных наблюдений (Рис. 14).

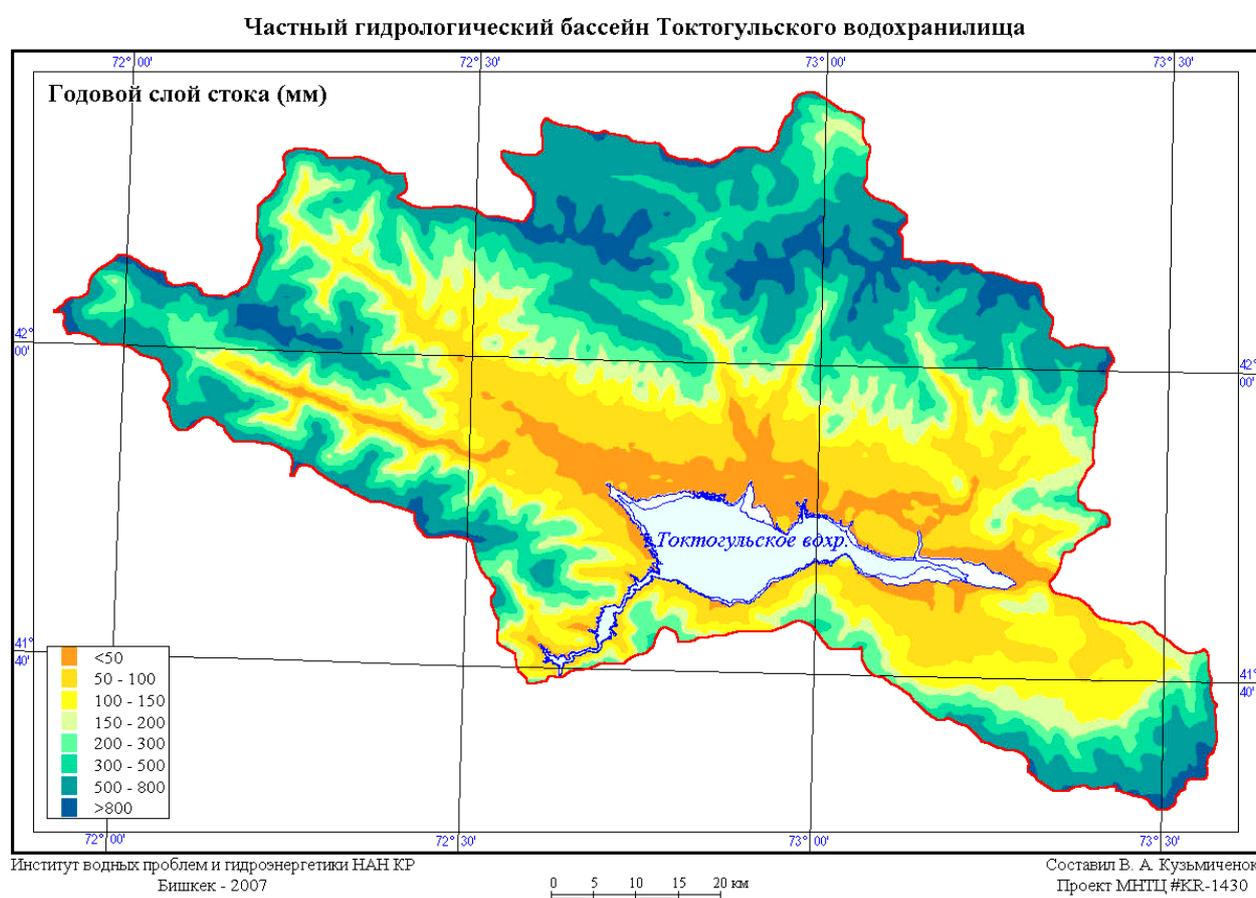


Рис. 14. Годовой слой стока, мм (Кузьмиченок, 2008).

Кузьмиченок В.А. использовал простую модель, в которой подземный сток отсутствует (Кузьмиченок, 2008):

$$P^{КУЗЬМИЧ} = w^{КУЗЬМИЧ} + E^{КУЗЬМИЧ} ,$$

где $P^{КУЗЬМИЧ}$ – слой осадков, мм/год; $w^{КУЗЬМИЧ}$ – слой поверхностного стока, мм/год; $E^{КУЗЬМИЧ}$ – слой испарения, мм/год.

При решении нестационарной задачи по определению $w^{МОД} < w^{КУЗЬМИЧ}$, так как в модели слой атмосферного питания разбивается на:

– составляющую $w^{МОД}$, которая описывает прямой поверхностный сток в реки,

– и инфильтрационную составляющую $\varepsilon^{МОД}$, формирующую разгрузку подземных вод в речную сеть, которая происходит с задержкой по времени.

При решении стационарной постановке, когда емкость пород не учитывается, можно использовать сравнение $w^{МОД}$ с $w^{КУЗЬМИЧ}$ для калибровки модели. С этой целью строился график $w^{МОД} \div w^{КУЗЬМИЧ}$. На графиках точки образовывали линию с уклоном 1:1, выходящую из начала координат. Резкие выбросы отсутствовали.

3. Кроме того проверяется следующий ряд условий:

А. Проверялось условие, согласно которому в области питания и транзита подземных вод уровни/напоры не могут быть выше/больше, чем отметка поверхности Земли. Исключение составляют долины рек. Для проверки строился график $h^{МОД} \div Alt$; области, в которых точки отклонялись вправо от линии 1:1 вправо проверялись на корректность задания исходных данных и/или на корректность счета.

Б. Проверялось условие, согласно которому уровни/напоры подземных вод в ячейках, в которых расположены колена рек, должны быть близки к уровням воды в реках (полученным по данным с топокарты). Для проверки строились графики $h^{МОД} \div h^{РЕКИ}$. Области, в которых точки отклонялись от линии 1:1 вправо, проверялись на корректность задания исходных данных и/или на корректность счета.

В. Проверялось условие, согласно которому уровни/напоры подземных вод в ячейках, которые расположены около водохранилища, должны быть близки к уровням воды в нем. Для проверки строился график $h^{МОД} \div h^{ВДХРН}$. Области, в которых точки отклонялись вправо или влево от линии 1:1, проверялись на корректность задания исходных данных и/или на корректность счета.

Г. Решение проверялось на отсутствие бросков. Для этого рассчитывался гидравлический градиент между соседними ячейками:

$$I^{МОД} = (h_2 - h_1) / l,$$

и уклоны рельефа между этими же ячейками:

$$I^{РЕЛЬЕФА} = (Alt_2 - Alt_1) / l$$

где h_2 и h_1 – уровни/напоры в ячейках, м; Alt_2 и Alt_1 – отметка рельефа в ячейках, м; l – расстояние между геометрическими центрами ячеек.

Выводились графики $I^{МОД} \div I^{РЕЛЬЕФА}$, которые по определению должны иметь вид прямых без резких отскоков отдельных точек.

Использовалась следующая особенность гидрогеологического режима моделируемой области. Между ячейками, расположенными вдоль побережья водохранилища, поперек фильтрационного потока, направленного к озеру, по определению должны отсутствовать значимые гидравлические градиенты $I^{МОД} = 0$.

Д. Сравнивались $h^{МОД}$ с данными с гидрогеологической карты, поскольку это был хотя и отрывочный, но единственный имеющийся в нашем распоряжении фактический материал.

Для корректировки модельного решения изменялись коэффициенты фильтрации (k_f) и инфильтрации (ε). После изменения названных параметров все расчеты и контрольные построения выполняются заново, до достижения приемлемого результата.

Расчет фильтрации в нестационарной постановке. Модель насыщено-ненасыщенной фильтрации частного водосбора Токтогульского водохранилища в нестационарной постановке является полным решением одной из задач проекта.

Для реализации этой модели вводилась нестационарность питания. Для этого задавалась зависимость P , E и ε от времени. На этапе расчета насыщено-ненасыщенной фильтрации в нестационарной постановке выполнялась калибровка емкостных параметров и уточнялся баланс модели. Калибровки модели выполнялась по описанной выше схеме, для чего сравнивался ряд расчетных модельных величин с их значениями, оцененными по данным наблюдений.

В дополнение к ранее использованным критериям калибровки использовались фактические данные по стоку р. Нарын (Рис. 15).

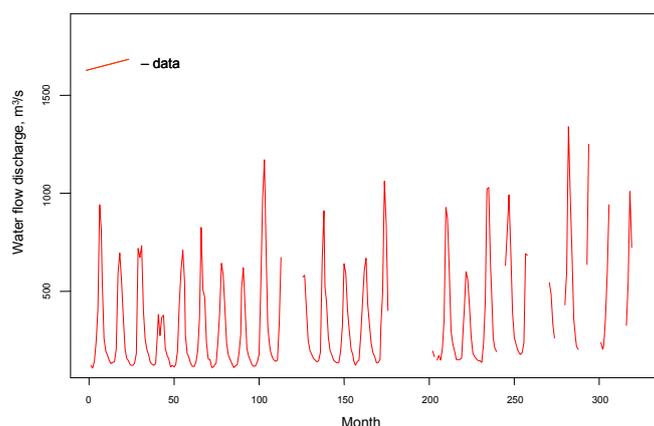


Рис. 15. Фактический сток по реке Нарын за 1964-2006 гг.

Моделирование изменения качества воды в водохранилище. Основой формирования качества воды в водохранилище является сток р. Нарын, которая дает вклад в водный баланс водохранилища на уровне 85 %.

В пределах Кетмень-Тюбинской котловины выделяются хребты Шамшыкалата¹ (на северо-восточном берегу водохранилища) и Орток-Тоо (на юго-восточном), в пределах которых распространены эвапориты. В связи с наличием легкорастворимых отложений эти участки являются источниками дополнительной солевой нагрузки для водохранилища.

В ходе проекта КР-1430 удалось показать, что основной ионный сток обусловлен поверхностным смывом (Толстихин и др. *Гидрохимические...*, настоящий сборник). По результатам натурных измерений установлено, что минерализация поверхностных вод, стекающих с гор Шамшыкалата (северо-восточный борт водохранилища) в зимнее время достигает 300 г/л.

В меньшей степени поступление солей в водохранилище обусловлено разгрузкой подземных вод. Минерализация подземных вод, согласно измерениям, может составлять 3-5 г/л, а горах Шамшыкалата – около 30 г/л. Для подземных вод отмечается слабая обратная зависимость солености воды от проницаемости пород (Рис. 16).

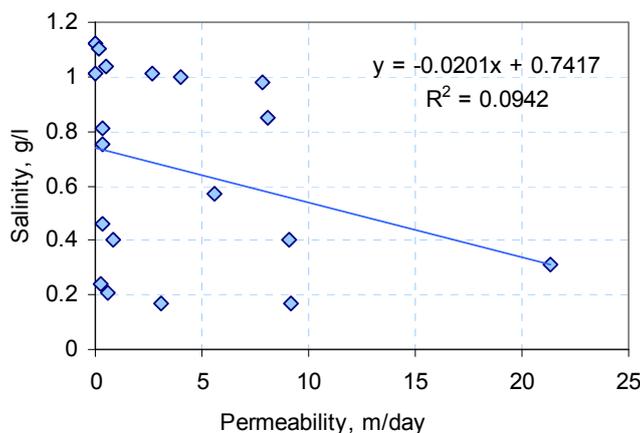


Рис. 16. Соотношение между проницаемостью пород и минерализацией подземных вод в бассейне Токтогульского водохранилища.

¹ – в горах Шамшыкалата ведется полупромышленная добыча поваренной соли.

Численная реализация. Для решения задачи массопереноса в области расположения гор Шамшыкалата для периодов моделирования, которое определяется как «зимнее время», задавалась повышенная минерализация составляющей водного баланса контролируемой параметром «атмосферные осадки».

Выводы. Построенная модель может быть использована для решения прогнозных задач при управлении сбросами воды из Токтогульского водохранилища. Для этого следует построить региональную модель погоды. В этой модели на основе вероятностного анализа должны быть учтены сценарии нормальных погодных условий (ряды лет с нормальной среднесезонной обеспеченностью атмосферными осадками). Кроме того, должны быть оценены возможности возникновения экстремальных условий, таких как, ряды маловодных и многоводных лет». Длина рядов, частота и последовательность чередования «нормальных», «маловодных» и «многоводных» лет должна задаваться исходя из анализа имеющегося гидрометеорологического материала на основании регрессионных моделей.

Литература

Кузьмиченок В.А. Цифровые модели характеристик увлажнения Кыргызстана. (Математико-картографическое моделирование). Бишкек, изд. Кыргызско-Российского славянского университета, 2008, 237 с.

Уточнение полезной емкости Токтогульского водохранилища. Отчет Института водных проблем и гидроэнергетики НАН КР о НИР по теме № Д-3-1103-44/143 - Бишкек: ИВП и ГЭ НАН КР, 2010- 58 с.