

### **3 Разработка математической модели геофильтрации в районе месторождения «Хотиславское»**

При выполнении научно-исследовательских работ по моделированию процессов геофильтрации и геомиграции, обусловленных отбором подземных вод, выделяются следующие этапы исследований:

- сбор и накопление материалов, характеризующих физико-географические и геолого-гидрогеологические условия исследуемой территории;
- систематизация исходной информации;
- типизация и схематизация гидрогеологических условий исследуемой территории и построение расчетной геофильтрационной схемы;
- выбор размеров площади моделируемой области фильтрации и построение расчетной математической модели территории;
- корректировка расчетной модели путем решения серии обратных стационарных задач и эпигнозного моделирования;
- решение прогнозных задач по оценке влияния отбора подземных вод на гидрологические и гидрогеологические условия прилегающей территории;
- анализ и обобщение результатов моделирования.

Моделирование процессов геофильтрации по теме работ осуществляется с помощью Многофункциональной автоматизированной системы (МАС-2000) моделирования движения подземных вод и оценки влияния их отбора на окружающую среду, разработанной РУП «ЦНИИКИВР» [23], имеющей международный сертификат Российского агентства по патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ) (**приложение В**).

В рамках МАС процесс моделирования может выполняться как на региональных, так и на локальных детальных моделях с необходимым уровнем детализации информации.

МАС состоит из четырех подсистем – ввода картографической информации, моделирования геофильтрации, моделирования геомиграции, подготовки промежуточных и отчетных документов.

Входной информацией являются данные о геометрии исследуемой области фильтрации в плане и в разрезе, граничных условиях и их изменениях, обусловленных протекающими за период моделирования гидрогеологическими процессами. Исходными данными являются также представленные в табличной форме массивы гидрогеологических и гидрохимических параметров расчетных горизонтов, информация об источниках загрязнения и отборе подземных вод, а также информация о процессе решения (режимы работы программ, режимы печати, коэффициент релаксации, шаги по времени, моменты времени для записи результатов расчета и т.д.).

Выходными данными являются массивы уровней подземных вод и концентраций загрязняющих веществ на заданные моменты времени, а также балансы геофильтрационных и геомиграционных потоков.

Краткое описание методики моделирования с помощью программы расчета MAC-2000 приведено в **приложении Г**.

### **3.1 Схематизация геолого-гидрогеологических условий**

Схематизация геолого-гидрогеологических условий, в соответствии с [21], является основой для построения модели природной обстановки и проведения в дальнейшем численных расчетов. При схематизации геолого-гидрогеологических условий до вида, допускающего проведение численных расчетов, в модели учитываются только те водоносные горизонты и слабопроницаемые пласты, которые оказывают определяющее влияние на получение конечного прогнозного решения с заданной точностью.

Согласно схемы гидрогеологического районирования территории Беларуси месторождение «Хотиславское» расположено в пределах Брестского артезианского бассейна. Геологическое строение и гидрогеологические условия рассматриваемой части территории бассейна в районе месторождения в частности, как следует из имеющихся материалов геолого-съёмочных, гидрогеологических и инженерно-геологических работ, изучены с достаточно высокой степенью детальности. Среди геолого-гидрогеологических работ последних лет, необходимо отметить специальные геолого-гидрогеологические изыскания БелГИИЗ (в настоящее время – УП «Геосервис») [17], комплексные геофизические исследования ПО «Беларусьгеология» (в настоящее время РУП «Белгеология») [18]. Перечисленные работы, в комплексе с научными исследованиями и обобщениями РУП «ЦНИИКИВР» и других специализированных организаций [2, 19, 20], выполнялись в 1990-1992 гг. для технико-экономического обоснования целесообразности строительства на базе месторождения «Хотиславское» Малоритского КСМ в части создания гидрогеологической модели месторождения и прилегающих территорий, и последующего получения на этой основе региональных оценок влияния эксплуатации месторождения на окружающую среду.

Для условий отработки II очереди месторождения «Хотиславское» определяющее значение будут иметь водоносные горизонты и слабопроницаемые слои, которые вскрываются карьерной выемкой. Для обоснования расчетной геофильтрационной схемы использованы литературные источники, архивные и фондовые материалы [4-20]. Опорной информацией для ее построения и обоснования установлены материалы разведки месторождения и специальные гидрогеологические исследования в районе месторождения

«Хотиславское», выполненные БелГИИЗ в 1991 г. [17]. Каталог картировочных скважин, а также опытных скважин, из которых БелГИИЗ были произведены кустовые и пробные откачки приведены в приложении А.

На **рисунках 3.1-3.5** представлены схема расположения разведочных буровых выработок и геолого-гидрогеологические разрезы, построенные с использованием указанной выше информации.

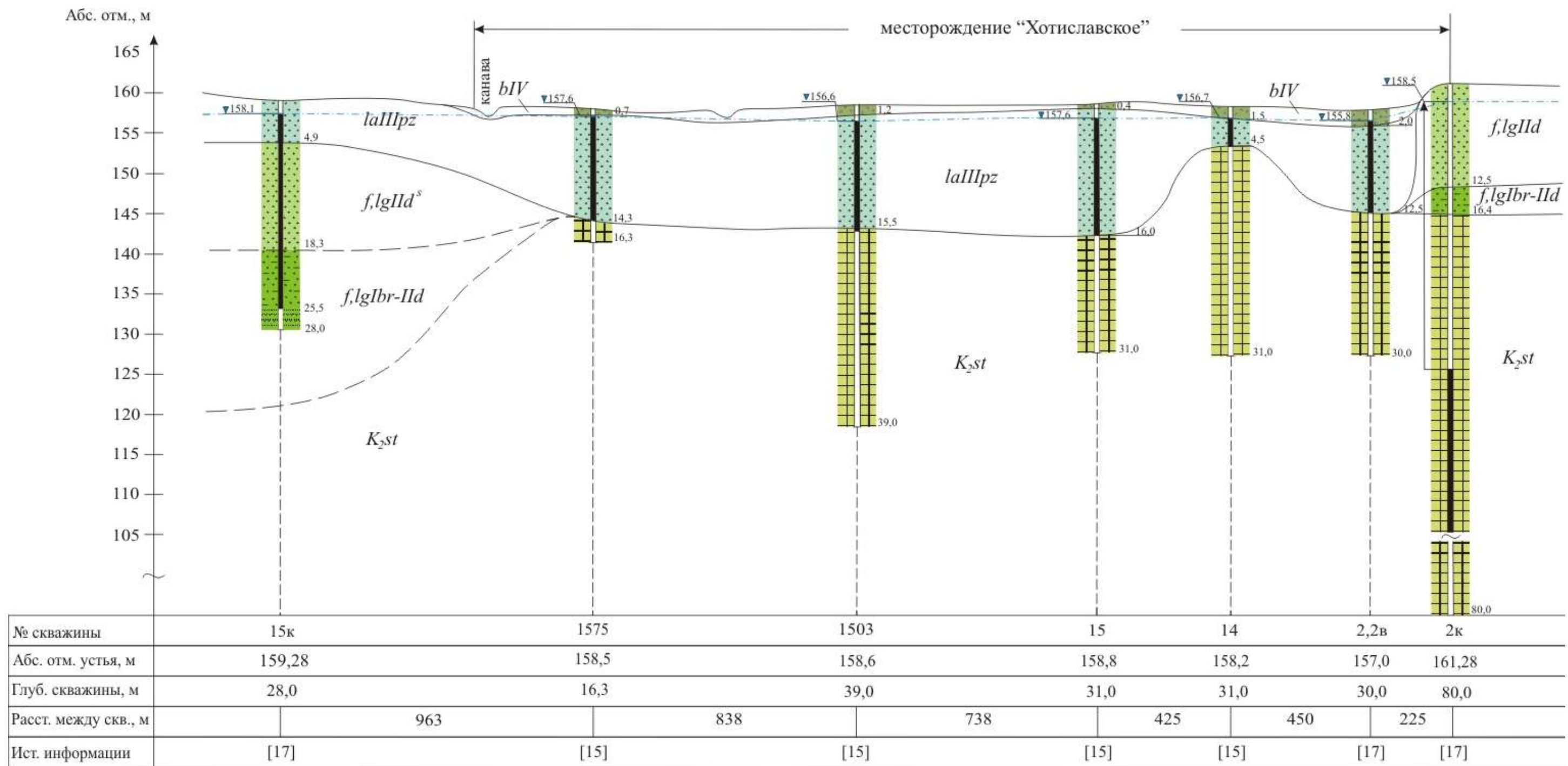
На основании этих исследований, а также материалов съемочных работ более раннего периода [5, 9] и геолого-гидрогеологических исследований при разведке месторождения [12], детально охарактеризовано геологическое строение четвертичных и дочетвертичных отложений, выполнено их литологическое расчленение в разрезе, изучены физико-механические и водные свойства водовмещающих отложений, выделены и опробованы опытными и кустовыми откачками водоносные горизонты. Установлено, что в связи с особенностями геологического строения района (отсутствие сплошных выдержанных водоупоров, хорошая проницаемость четвертичных отложений), особенности морфологии рельефа (слабая расчлененность местности, неглубокий врез речных долин), избыточное увлажнение в связи с влажно-умеренным климатом и значительным количеством выпадающих атмосферных осадков (540-690 мм), обуславливают благоприятные условия для формирования водоносных горизонтов в распространенных здесь рыхлых горных породах, неглубокое залегание уровня грунтовых вод и их гидравлической связи с нижележащими водоносными горизонтами.

Повсеместно обводненная толща рыхлых четвертичных образований залегает на сильно эродированной поверхности меловых отложений. По генезису и литолого-фациальным признакам толща четвертичных осадочных пород разделяется на несколько слоев. Верхний слой – отложения современных болотных и верхнечетвертичных покровных озерно-аллювиальных образований. Болотные отложения (торф и заторфованные пески и супеси) широко распространены в центральной и северной частях месторождения. Максимальная мощность их составляет 3,2 м. Озерно-аллювиальные (пески мелкозернистые до тонкозернистых) имеют повсеместное распространение в пределах месторождения и прилегающих площадей, их мощность колеблется от 1,4 до 9,0 м. Второй слой: отложения днепровского горизонта – надморенные водноледниковые песчаные образования времени отступления днепровского ледника, по своей мощности являются преобладающими в разрезе территории. По гранулометрическому составу относятся к среднезернистым, реже мелко и крупнозернистым пескам. Мощность песков от 5,0 до 10,0 м, в среднем составляет 6,0-8,0 м. Третий слой: отложения березинского-днепровского горизонта – надморенные водноледниковые песчаные образования мощностью от 2,0 до 10,0 м. Представлены также



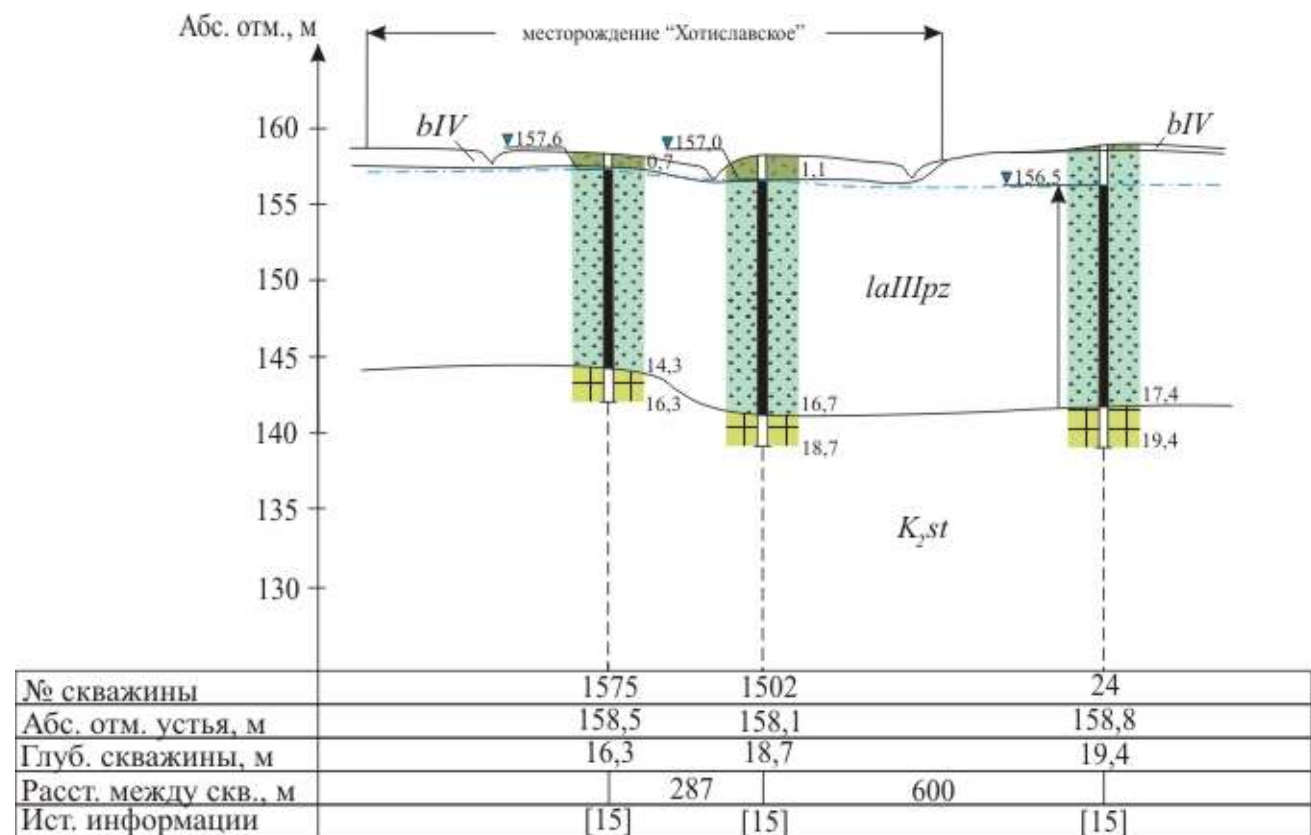
- Условные обозначения
- - горный отвод № 3 от 9.07.2004 г.
  - I очередь отработки месторождения
  - II очередь отработки месторождения
  - 2,2в - местоположение скважины и ее номер
  - ▣ 6 - местоположение шахтного колодца и его номер
  - |— - линия геолого-гидрогеологического разреза и его номер

Рисунок 3.1 - Карта-схема размещения разведочных буровых выработок, геолого-гидрогеологических разрезов и обследованных шахтных колодцев. Масштаб 1:100000



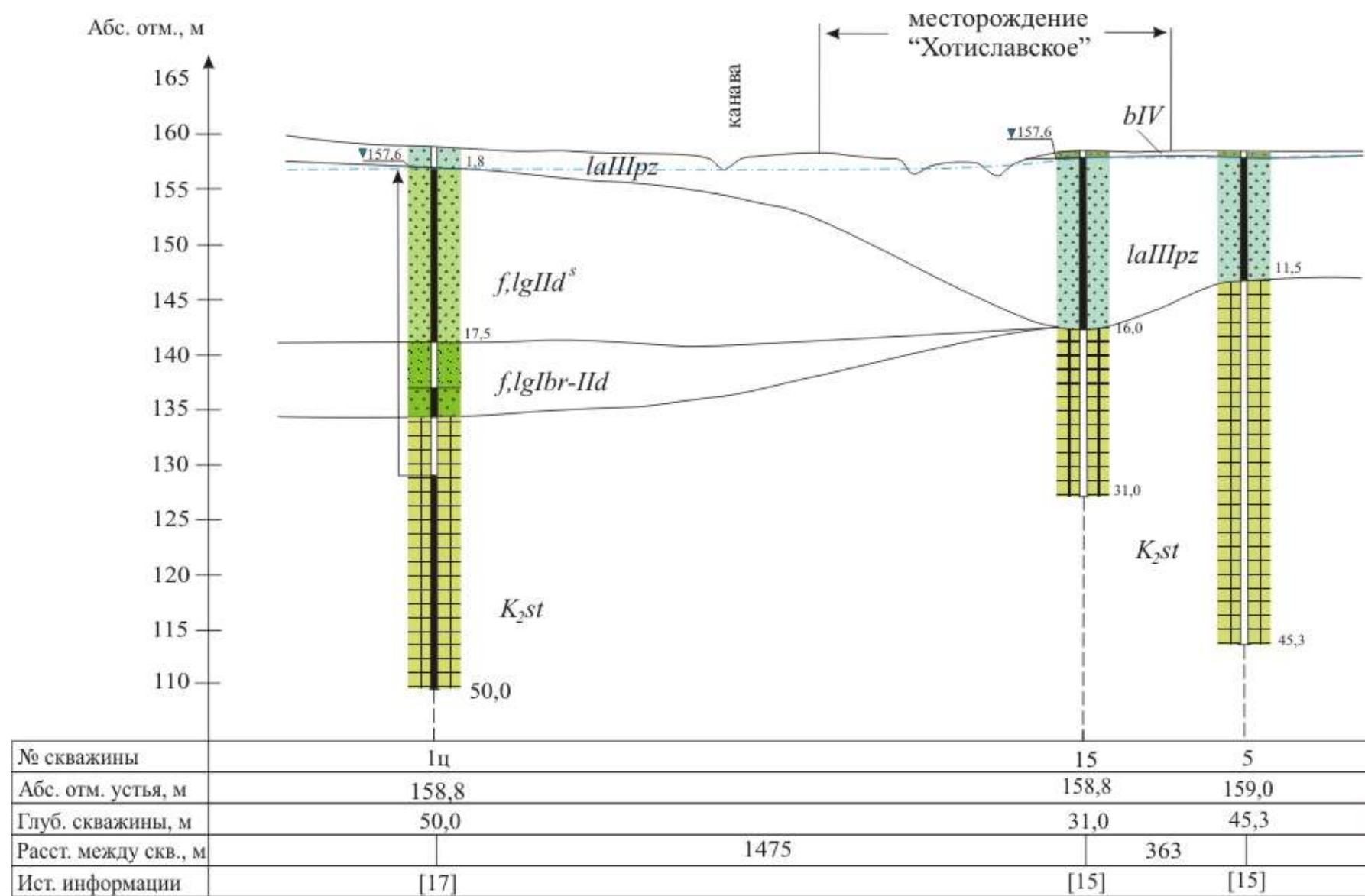
Условные обозначения см. стр.

Рисунок 3.2 - Геолого-гидрогеологический разрез по линии I-I. Масштаб горизонтальный 1:125 000, вертикальный 1:500



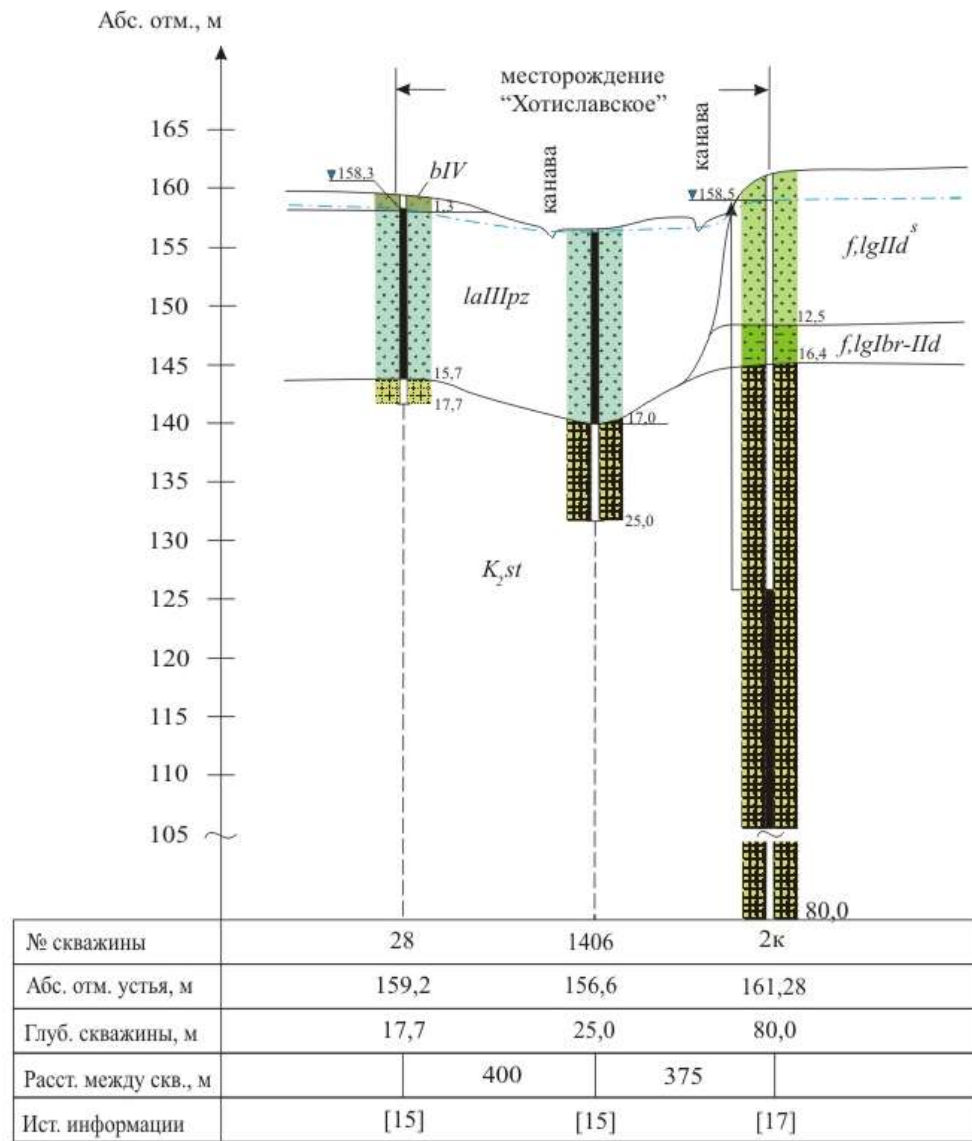
Условные обозначения см. стр.

Рисунок 3.3 - Геолого-гидрогеологический разрез по линии II-II. Масштабы: горизонтальный 1:100 000, вертикальный 1: 500



Условные обозначения см. стр.

Рисунок 3.4 - Геолого-гидрогеологический разрез по линии III-III. Масштаб горизонтальный 1:125 000, вертикальный 1:500







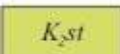
Условные обозначения см. стр.

Рисунок 3.5 - Геолого-гидрогеологический разрез по линии IV-IV. Масштабы: горизонтальный 1:125 000, вертикальный 1: 500



## Условные обозначения к геолого-гидрогеологическим разрезам

### Геологические подразделения

	- голоценовые болотные отложения
	- поозерские озерно-аллювиальные отложения
	- днепровские надморенные водноледниковые отложения
	- березинско-днепровские флювиогляциальные отложения
	- верхнемеловые нерасчлененные отложения сантонского яруса

### Литологический состав пород

	- пески
	- супеси
	- торф
	- глины
	- мел

среднезернистыми и крупнозернистыми песками с редкими прослоями супесей и суглинков. Общая мощность четвертичных отложений в пределах месторождения и на прилегающих территориях изменяется от 10,0 до 19,0 м. Как уже отмечалось, выдержанных по простиранию слабопроницаемых отложений, выполняющих гидродинамические функции разделяющего слоя, в разрезе четвертичных отложений нет.

Рассмотренные литологические разности четвертичных отложений являются водовмещающими отложениями водоносных горизонтов, которые по условиям залегания, питания и характеру коллекторских свойств могут быть объединены в единый водоносный комплекс. Его питание в пределах всей изучаемой территории происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, а разгрузка – в р. Рита. Воды верхней части водовмещающей толщи отложений в районе месторождения сдренированы системой мелиоративных каналов. Водоносный комплекс по своим гидродинамическим характеристикам является грунтовым. Глубина залегания уровня грунтовых вод составляет 1,5-3,0 м. Фильтрация грунтовых вод в естественных условиях происходит в субмеридиональном направлении со стороны Черноморско-Балтийского водораздела, в данном случае совпадающего с водоразделом грунтовых вод. В пределах водораздельной части глубина залегания уровня грунтовых вод повышается до 5-6 более метров.

Слабопроницаемые моренные отложения днепровского горизонта имеют локальное площадное распространение, тяготея, в основном, к водораздельным пространствам, где залегают в средней части разреза. Наиболее широкое распространение отложения получили в северной части района (у г.п. Малорита), а также к югу от месторождения «Хотиславское» на водораздельной части между р. Рита и каналом Турский, где их мощность достигает 15,0-20,0 м. На большей части территории исследований мощность днепровской морены составляет 5,0-10,0 м. Слабопроницаемые моренные отложения березинского горизонта также локально распространены, но в отличие от днепровских, развиты в нижней части разреза и тяготеют к переуглубленным палеодолинам ледникового выпавивания. Мощность этих отложений в разрезе изменяется от 1,0-5,0 до 10,0-15,0 м. Карты распространения слабопроницаемых четвертичных отложений по материалам [18] представлены в приложении Б.

Таким образом, по данным геофизических и гидрогеологических исследований отложения днепровской и березинской морен в силу локального развития и невыдержанности в разрезе, и, кроме того, различного гипсометрического положения в нем, не могут быть объединены в один слабопроницаемый разделяющий слой. Отложения могут вызывать местное ослабление степени взаимосвязи водоносных горизонтов и частично обуславливать напорность нижележащих.

Основные фильтрационные характеристики и параметры четвертичных отложений, полученные в ходе выполнения опытно-фильтрационных работ при геолого-съемочных и разведочных работах, представлены в **таблице 3.1**.

БелГИИЗ в ходе выполнения опытно-фильтрационных работ, произвел поинтервальное опробывание скважин, оборудованных на верхнемеловой горизонт. Интервалы опробывания (открытый ствол скважин) выбраны с учетом опыта исследований прежних лет: 28,0-50,0 м; 40,0-60,0 м; 59,0-80,0 м и 81,0-100,0 м.

Обработка результатов пробных откачек показала, что водопроницаемость меловых отложений верхнего интервала (28,0-50,0 м) составляет 84-94 м<sup>2</sup>/сут, в интервале 40,0-60,0 м – 55 м<sup>2</sup>/сут, в то время как нижних (59,0-80,0 м и 81-100,0 м), соответственно 0,48 и 0,14 м<sup>2</sup>/сут.

В трех скважинах (№№ 8ц, 2к, и 1ц), оборудованных на верхнемеловой водоносный горизонт, проведены работы по определению расходомерии, залегающих в разрезе на глубине 28,0 м и более (**таблица 3.2**).

Опробывание отложений мергельно-меловой толщи залегающих на глубине свыше 50-60 м, проведенное в пределах района исследований БелГИИЗ и смежных территорий ПО «Беларусьгеология» [24], свидетельствует об их низких фильтрационных свойствах. В **таблице 3.3** приведена сравнительная характеристика результатов этих исследований. Аналогичные результаты получены при обработке данных откачек, произведенных из верхнемеловых отложений на территории Украины [19]. Результаты обработки представлены на графике (**рисунок 3.6**). Близость значений полученных параметров водопроницаемости и фильтрационных свойств в целом, позволяет сделать вывод о сходных гидродинамических особенностях верхнемеловых отложений, характеризующих толщу мела, залегающую на глубине свыше 60,0 м, как слабопроницаемый слой (**таблица 3.4**). Величину коэффициента фильтрации в вертикальном направлении ( $K_0$ ), равную  $5 \cdot 10^{-3}$  м/сут, считаем приемлемой исходной величиной для дальнейших расчетов процессов перетекания.

Таким образом, мощная водонасыщенная толща мергельно-меловых пород охарактеризована как трехслойная, где первый слой – слабопроницаемая «зона заиления»; второй – верхняя трещиноватая зона мощностью 30,0-35,0 м, третий слой – нижняя толща мергельно-меловых пород мощностью до 190,0 м, является относительно слабопроницаемым слоем, к которому приурочен слабОВОДОНОСНЫЙ горизонт мергельно-меловой толщи.

Таблица 3.1 – Сводная таблица результатов опробывания водовмещающих четвертичных отложений (по материалам [14-17])

Источник информации	№№ скв.	Местоположение скважины	Тип откачки	Литология водовмещающих пород	Интервал посадки фильтра, м	Понижение уровня воды в скважине, м	Дебит скважины, л/с	Коэффициент фильтрации, м/сут
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Верхнечетвертичные и современные озерно-аллювиальные отложения ( <i>laIII – IV</i> )								
Предварительная разведка месторождения «Хотиславское»	4г	Центральная часть месторождения	Кустовая	Песок мелкозернистый	5,0-10,0	5,0	4,2	13,0
	1570б	Юго-восточная часть месторождения	Кустовая	Песок мелкозернистый	7,5-12,0	4,0	4,0	19,0
	1538ц	Юго-восточная часть месторождения	Кустовая	Песок тонкозернистый	Н.с.	6,15	3,0	4,5
Изыскания БелГИИЗ	5ц	3,4 км южнее д. Отчин	Кустовая	Песок среднезернистый	3,0-8,5	2,6	4,5	43,0
Надморенные водноледниковые отложения днепровского горизонта ( <i>f,lgIIa<sup>с</sup></i> )								
Изыскания БелГИИЗ	5ц	3,4 км южнее д. Отчин	Кустовая	Песок среднезернистый	10,8-16,3	4,8	1,3	32,8
	1ц	1,3 км западнее д. Сушитница	Кустовая	Песок среднезернистый	11,7-17,2	12,4	3,6	20,0
Межморенные водноледниковые березинско-днепровские отложения ( <i>f,lgIbr – IIa</i> )								
Изыскания БелГИИЗ	2ц	2,5 км ЮЮВ д. Сушитница	Кустовая	Песок среднезернистый	12,0-17,5	8,1	8,0	14,0
	14ц	1,4 км СВ скв.2	Одиночная	Песок среднезернистый	14,6-20,1	4,5	5,3	12,3

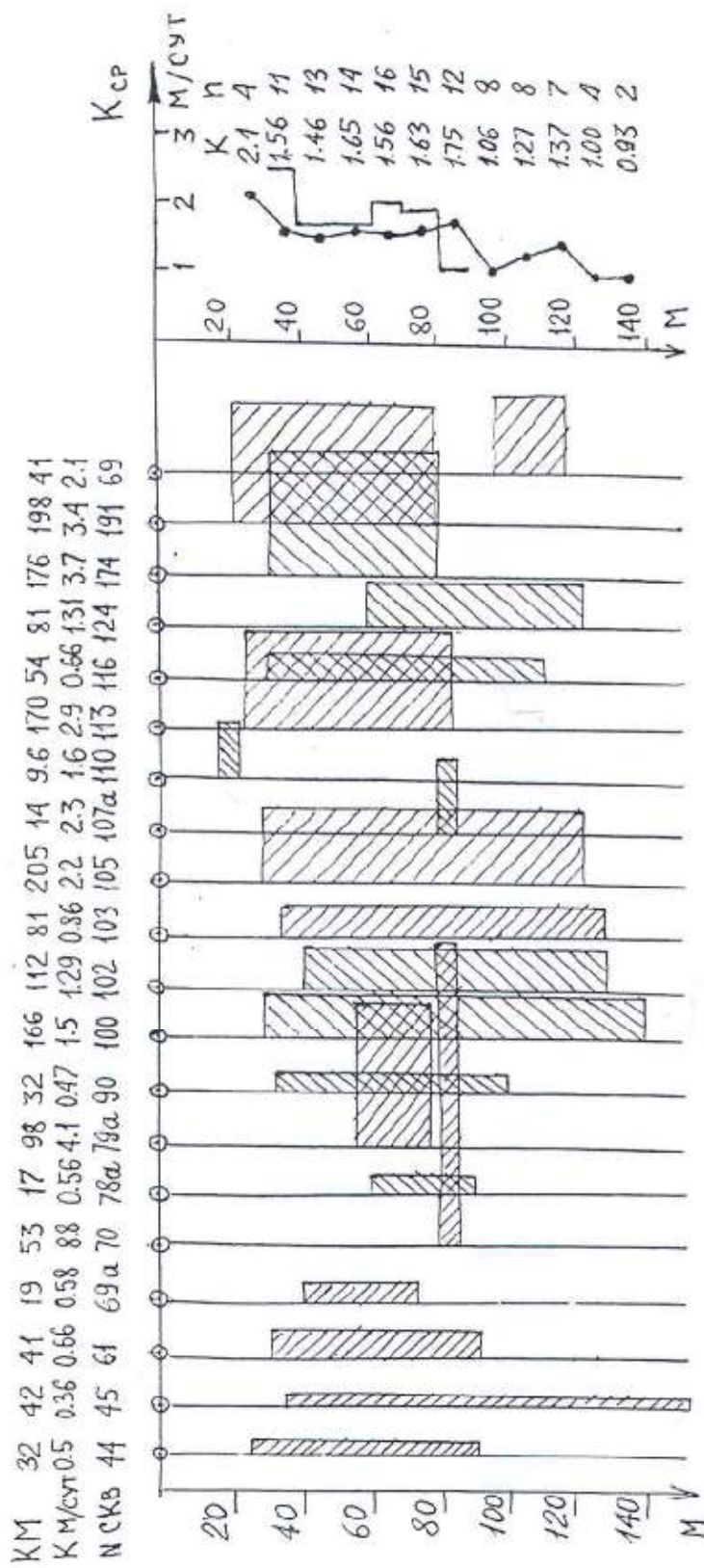


График распределения  
K<sub>ср</sub> по данным ОФР

ТО же по данным  
расходомеры

Рисунок 3.6—Распределение коэффициента фильтрации горизонта песчих мелов по глубине скважин ( по материалам Винника М.М., 1990 г.) [19]

Таблица 3.2 – Результаты проведения БелГИИЗ опытов расходомерии мелов [17]

№ скв.	Интервал опробывания скважин, м	Интервал опробывания при расходомерии, м	Мощность, м	Величина водопритока в интервале от общего водопритока в скв., в %	Дебит скважины, л/с
8ц	42-60	44-51	7	85	4,00
1ц	28-50	34-41	7	40	3,30
2ц	59-80	70-74	4	42	0,83

На основании изложенного делаем заключение, что гидрогеологические условия района месторождения «Хотиславское» определяются наличием двух водоносных комплексов – безнапорного четвертичных отложений и напорного верхнемеловых отложений.

В естественных условиях безнапорный четвертичный водоносный комплекс представляет собой поток грунтовых вод, движение которых происходит перпендикулярно южному контуру месторождения со стороны Главного Европейского водораздела бассейнов Черного и Балтийского морей. Движение осуществляется в сложной среде, характеризующейся повышенной изменчивостью фильтрационных свойств в плане и существенными различиями водопроницаемости по слоям.

В целом, в гидродинамическом отношении поток грунтовых вод может быть охарактеризован как водоносная система – безнапорный водоносный пласт, ограниченный сверху свободной поверхностью грунтовых вод, снизу эродированной и относительно слабопроницаемой поверхностью «зоны заиления» меловых пород, с суммарной водопроницаемостью по слоям, в котором водовмещающим отложениям преимущественно присуща гравитационная водоотдача (по данным съемочных работ 10-25 % [5, 9]) и прямое питание за счет инфильтрации атмосферных осадков.

Таким образом, анализ имеющейся гидрогеологической информации для обоснования геофильтрационной модели района позволил остановиться на расчетной схеме техслоного в разрезе пласта, с двумя водоносными горизонтами, разделенными слабопроницаемым слоем: первый к совместной толще четвертичных и палеогеновых отложений, второй к верхнемеловым отложениям. Разделяющий слой – к слабопроницаемым отложениям «зоны заиления» мергельно-меловой толщи верхнего мела.

Таблица 3.3 – Фильтрационные свойства мергельно-меловой толщи.

Источник полученных сведений	Пункт опробывания	Мощность меловых пород, м	Интервал опробывания, м	Водопроницаемость, м <sup>2</sup> /сут		Коэффициент перетекания, м	Коэффициент фильтрации отложений в опробываемом интервале, м/сут	Расчетный коэффициент фильтрации K <sub>0</sub> , м/сут
				Горизонтальная	Вертикальная			
Поисково-разведочные работы для водоснабжения г. Березины [22]	куст 14	73	Н.с.	105		1450		5·10 <sup>-3</sup>
	куст 15	68	Н.с.	200		1970		
	куст 14б	73	Н.с.		0,43	1450	5,9·10 <sup>-3</sup>	
Специальные гидрогеологические исследования БелГИИЗ, 1991 г. [17]	куст 8ц	н.с.	39,5-60	122		990		
	куст 2ц	162	28,0-50	86		890		
	куст 2	162	40,0-60	55				
	куст 2к	162	59,0-80	1			5,0·10 <sup>-2</sup>	
	куст 2с	162	81,2-100	0,14			8,0·10 <sup>-3</sup>	

Таблица 3.4 – Значения основных гидрогеологических параметров по результатам опытно-фильтрационных работ для меловых отложений

Гидрогеологические параметры	2	2к	14	Куст 1ц				Куст 1ц (групповой)				Куст 8			
				1ц	1А	1Б	1В	1ц	1А	1Б	1В	8	8А	8Б	8В
1. Коэффициент водопроницаемости, м <sup>2</sup> /сут															
а) по графикам снижения уровней		0,98	33		145	190	193		125	135	128		117	122	126
б) по графикам восстановления уровней	0,14	0,35	45	180	180	186	186	117	103	114	188	154	141	144	147
в) по графику площадного прослеживания снижения уровней						100			99				361		
г) по графику комбинированного прослеживания снижения уровней						168			110						
2. Коэффициент пьезопроводности, м <sup>2</sup> /сут															
а) по графикам снижения уровней					$1,8 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$		$1,0 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^5$	$6,6 \cdot 10^5$		$1,6 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^5$
б) по графикам восстановления уровней					$4,7 \cdot 10^5$	$8,9 \cdot 10^4$	$4,4 \cdot 10^4$		$3,7 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^4$		$6,6 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^4$	$6,7 \cdot 10^4$
в) по графику площадного прослеживания снижения уровней					$3,2 \cdot 10^3$				$2,6 \cdot 10^3$				$3,4 \cdot 10^8$		
г) по графику комбинированного прослеживания снижения уровней					$9,3 \cdot 10^5$				$5,9 \cdot 10^5$						



### 3.2 Краткая характеристика численной расчетной модели геофильтрации

Разбивка области фильтрации на расчетные блоки в плане определяется общей площадью исследуемой территории, целью решаемой задачи, плотностью и достоверностью исходных данных.

Границы моделируемой области фильтрации в районе месторождения «Хотиславское» определены исходя из целевой задачи оценки влияния его отработки на природные охраняемые территории, расположенные на Украине и, прежде всего, Национальный парк «Шацкие озера».

Для построения расчетной модели исходная область фильтрации разбита на расчетные блоки по неравномерной сетке, образованной совокупностью прямых, параллельных координатным осям  $X$  и  $Y$ .

Общая площадь района исследований составляет  $896,0 \text{ км}^2$ . Его протяженность с севера на юг составляет  $28,0 \text{ км}$ , а с запада на восток  $32,0 \text{ км}$ . Разбивочная сетка модели неравномерная, общее количество блоков по оси  $X$  –  $193$ , по оси  $Y$  –  $165$ . Размеры расчетных блоков составляют  $50 \times 50 \text{ м}$ , на периферии модели увеличиваются до  $1000 \times 1000 \text{ м}$  (рисунок 3.7, приложение Д).

Расчетная модель характеризуется послойными массивами фильтрационных параметров, установленных в результате анализа исходной информации.

Верхней границей области фильтрации является уровень грунтовых вод (УГВ). На верхней границе модели задается инфильтрационное питание ( $W$ ), зависящее от глубины залегания уровня грунтовых вод по формуле:

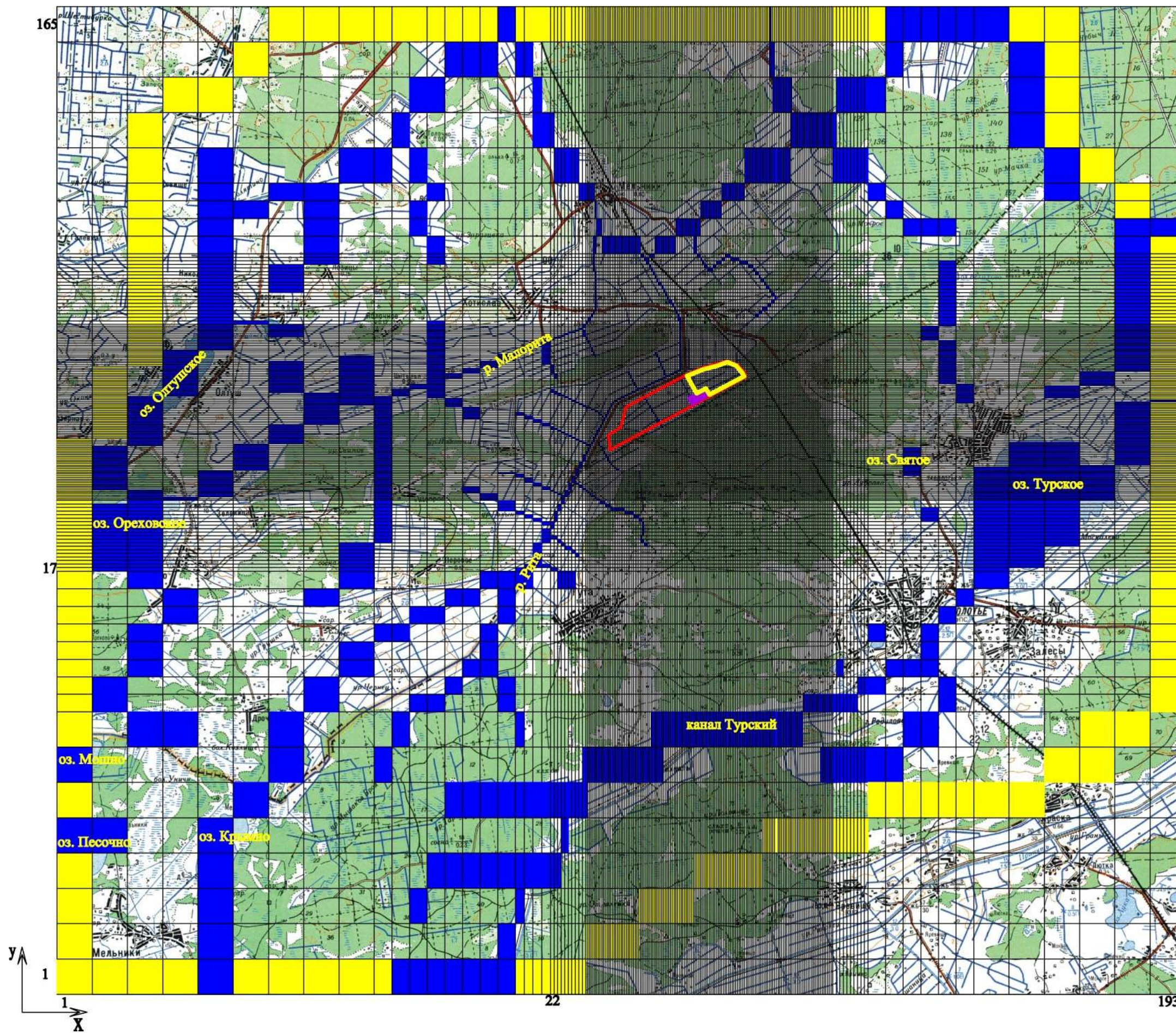
$$W = 2,68 \cdot (W_n - U) \quad (3.1)$$
$$W_n = 6e^{3,829 - 0,138z}; \quad U = 0,01W_n e^{5,006 - 0,401z},$$

где  $z = z_0 + S$  прогнозная глубина залегания уровня грунтовых вод,  $z_0$  – начальная глубина залегания грунтовых вод,  $S$  – понижение уровня грунтовых вод,  $W_n$  – инфильтрация атмосферных осадков,  $U$  – испарение с зеркала грунтовых вод.

Зависимость (3.1) является условием III рода ( $Q = f(z)$ ).

Нижняя граница области фильтрации устанавливается по поверхности толщи слабопроницаемого разделяющего слоя.

Естественными внутренними границами модели являются водоемы и водотоки, которые задаются условиями III ( $Q = f(z)$ ) или II рода ( $Q = \text{const}$ ) в зависимости от характера взаимосвязи поверхностных и подземных вод.



**Условные обозначения**

-  - разбивочная сетка исходной области фильтрации
-  - месторождение мела "Хотиславское"
-  - I очередь отработки месторождения
-  - II очередь отработки месторождения
-  - модельные блоки рек и каналов
-  - модельные блоки границы расчетной модели

**Рисунок 3.7 - Расчетная модель территории исследований. Масштаб 1:100 000**

Гидродинамические условия на контурах рек рассматриваются как внутренние граничные условия третьего рода до момента снижения напора в водоносном горизонте до уровня подошвы подрусовых отложений, после чего на реке или ее участке происходит автоматический переход от граничных условий III рода к граничным условиям II рода. Величина фильтрационных потерь на контуре водотока определяется пропускной способностью подрусовых отложений. Пропускная способность вычислялась через модельные значения вертикальной проводимости подрусовых отложений, характеризующие степень взаимосвязи поверхностных и подземных вод, и которые определялись исходя из фильтрационного сопротивления подрусовых отложений, водопроницаемости водоносного горизонта и ширины реки в расчетном блоке.

### **3.3 Корректировка построенной расчетной геофильтрационной модели для существующей гидролого-гидрогеологической обстановки на изучаемой территории путем решения обратных задач геофильтрации**

При решении задачи оценки влияния эксплуатации водохозяйственных объектов на подземные воды важно знать, с какой степенью достоверности и точности выполнена схематизация гидролого-гидрогеологических условий района, построена геофильтрационная схема и на ее основе составлена расчетная модель исследуемой территории. Процесс обоснования достоверности модели представляет последовательное решение серии обратных стационарных и нестационарных задач геофильтрации.

Основная цель таких задач состоит в уточнении, или определении, в контрольных точках или участках модели геофильтрационных параметров интенсивности питания водоносных горизонтов, а также закономерностей распределения их на площади по результатам наблюдений за естественным или нарушенным режимом подземных вод.

Используемая РУП «ЦНИИКИВР» для численных расчетов Многофункциональная автоматизированная система моделирования движения подземных вод (МАС-2000) предполагает решение стационарных и нестационарных задач (прогнозное моделирование) в автоматизированном режиме.

Корректировка исходной модели на основе решения серии обратных задач выполняется с целью получения компьютерной модели, достоверно отображающей природные условия исследуемой территории. Критерием достоверности является совпадение модельных и естественных уровней подземных вод и подземного стока в реки с заданной точностью. Модель геофильтрации считается корректной, если после решения обратных задач модельные значения величин подземного стока в реки по расчетным створам отличаются от реальных не более, чем на 20 %, модельные значения уровней подземных вод

водоносных горизонтов во всех расчетных блоках модели отличаются от реальных не более, чем на 2,0 м в большую или меньшую сторону, а общий дисбаланс по модели не превышает 5 %. Корректировка модели производится путем уточнения определенной исходной гидрогеологической информации в конкретных блоках расчетной модели, где отмечаются существенные различия в положении исходных и модельных уровней и расходов подземных вод.

В основу решения задач положен воднобалансовый метод анализа условий формирования подземных вод. В общем случае для стационарных условий принимается предпосылка о существующем гидродинамическом равновесии в водоносных системах естественного формирования, при котором естественное распределение напоров в горизонтах отражает стабильное во времени равновесие между их горизонтальным и вертикальным водообменами. В связи с этим на модели подбираются соотношения параметров водопроницаемости водоносных слоев, интенсивности питания, водообмена между водоносными горизонтами и поверхностными водами, при котором распределение напоров подземных вод на модели соответствует естественному.

При нестационарных условиях баланс подземных вод зависит от изменения во времени количества воды, связанного с колебаниями уровня подземных вод и емкости водоносных пластов. В ходе решения этих задач на модели осуществляется подбор характеристик водоотдачи водоносных пластов, а также определяются граничные условия потоков.

Подбор всех параметров осуществляется на основе анализа имеющейся гидрогеологической информации.

Обратная стационарная задача геофильтрации в пределах моделируемой области фильтрации решалась на период, предшествующий вводу в эксплуатацию I очереди месторождения «Хотиславское». Исходным календарным годом установлен 2007 г.

Основное внимание при решении обратной стационарной задачи уделено уточнению исходных фильтрационных параметров и их распределению в плане изучаемой территории. Исходной информацией, характеризующей численные значения фильтрационных параметров, являются построенные специальные карты гидрогеологических параметров (**приложения Е-II**). В цифровом виде карты представлены в **приложениях Р, С**.

При решении обратной стационарной задачи подбор значений фильтрационных параметров проводился для участков расчетной модели, на которых несовпадение (невязка) натуральных и модельных уровней УГВ выражалась значительной по величине невязкой – более  $\pm 2,0$  м. При этом корректировались следующие фильтрационные параметры:

водопроницаемость водовмещающих отложений, величина инфильтрационного питания, вертикальная проницаемость подрусловых отложений.

Проведена серия обратных стационарных задач, включающая 12 вариантов подбора расчетных параметров.

Карта-схема невязки натуральных и модельных значений УГВ (первый водоносный слой) на расчетной модели, полученной в результате решения обратной стационарной задачи, приведена в **таблице 3.5**. Карта-схема невязки натуральных и модельных значений напорного водоносного горизонта верхнемеловых отложений (второй водоносный слой) приведена в **таблице 3.6**. Удовлетворительное сходство натуральных и модельных значений УГВ получено при следующих значениях расчетных параметров:

- водопроницаемость водовмещающих отложений грунтовых вод – 50-840 м<sup>2</sup>/сут;
- глубина залегания УГВ – 0-1,92 м;
- интенсивность инфильтрационного питания – от 18 до 111 мм/год.

При решении обратной стационарной задачи корректировке планового распределения расчетных параметров подвергались:

1) коэффициент фильтрации водовмещающих отложений грунтовых вод с 0,5 м/сут (исходное значение в расчетной модели) до 10,0-28,0 м/сут в пределах отдельных участков области фильтрации;

2) глубина залегания УГВ в пределах отдельных участков области фильтрации расчетной модели уменьшена с 2,0 м до 0,51-0,90 м, с 3,0 м до 1,23-1,41 м, с 5,0 м до 1,73-1,92 м;

3) величина фильтрационного сопротивления (проницаемость) подрусловых отложений в ложе постоянных водотоков составила от 0,00078 до 0,0043-0,021 л/сут.

Проведена также корректировка расчетной величины инфильтрационного питания грунтовых вод на верхней границе модели, которое представлено как разность между инфильтрацией осадков и испарением влаги с зеркала грунтовых вод. При решении стационарных задач величина инфильтрационного питания грунтовых вод контролировалась величиной подземного стока грунтовых вод в водотоки, определенного гидрологическими методами.

В итоге определено, что суммарная величина естественных ресурсов грунтовых вод в пределах моделируемой области (приходные статьи баланса) составляет около 118,5 тыс. м<sup>3</sup>/сут или около 43,2 млн. м<sup>3</sup>/год. Расходные статьи баланса грунтовых вод в естественных условиях формировались за счет двух элементов баланса: подземный сток в постоянные водотоки – 107,93 тыс. м<sup>3</sup>/сут и перетекание в нижележащий водоносный горизонт – 17,79 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Приходные – за счет притока по границам модели –





Таблица 3.6 – Карта-схема невязки модельных и натурных значений УГВ во втором водоносном горизонте, м





19,41 тыс. м<sup>3</sup>/сут; инфильтрационное питание – 83,28 тыс. м<sup>3</sup>/сут и перетекания из нижележащего напорного водоносного горизонта верхнемеловых отложений – 15,78 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Второй водоносный горизонт на модели (водоносный горизонт верхнемеловых отложений) в пределах границ расчетной модели по состоянию на расчетный календарный год (2007 г.) характеризовался величиной естественных ресурсов (перетекание из вышележащего горизонта грунтовых вод), равной 17,78 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Итоговый, по результатам решения стационарной задачи, баланс подземных вод приведен в **таблице 3.7**.

Для получения достоверных гидрогеологических прогнозов необходимо оценить степень достоверности выполненных построений, а также последующих расчетов. Оценка достоверности производится по двум уровням.

Первый – оценка достоверности определения одного из главных элементов баланса подземных вод – величины подземной составляющей питания речных водотоков, задаваемых на расчетной модели (стационарная постановка задачи). Второй – проверка достоверности модельной схемы по составлению модельных и натурных данных значений напоров водоносных горизонтов (нестационарная постановка задачи).

Величина подземного стока в реки на модели при решении стационарной задачи определена в размере 107,93 тыс. м<sup>3</sup>/сут (или 39,4 млн. м<sup>3</sup>/год). В том числе: подземный сток в р. Рита (с притоками) – около 70,9 тыс. м<sup>3</sup>/сут; в канал Турский – 28,9 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Величина составляющей питания рек для естественных условий формирования подземных вод, рассчитанной гидрогеологическими методами, составляет соответственно: для р. Рита (с притоками) – 75,7 тыс. м<sup>3</sup>/сут; для канала Турский – 30,97 тыс. м<sup>3</sup>/сут (**таблица 3.8**).

Таким образом, на первом уровне проверки достигнута степень совпадения природной и модельной структур грунтовых вод (погрешность расчетов не превышает 10%) свидетельствует о достаточной степени достоверности расчетной модели природным условиям.

Второй уровень проверки достоверности модели выполнен при решении нестационарных задач геофильтрации (эпигнозного моделирования) путем сопоставления напоров водоносных горизонтов на модели и в натуре, последние из которых получены в период проведения режимных наблюдений на карьере I очереди.

Систематические наблюдения за режимом подземных вод в районе месторождения «Хотиславское» начаты только с 2008 г., когда была оборудована наблюдательная скважина 1н в районе границы Беларуси и Украины.

Таблица 3.7 – Итоговый баланс подземных вод по результатам решения стационарной (обратной) задачи

*****ИТОГОВЫЙ БАЛАНС ПО МОДЕЛИ***** (КУБ.М/СУТ)				*****ИТОГОВЫЙ БАЛАНС ПО МОДЕЛИ***** (КУБ.М/СУТ)			
ГОРИЗОНТ-1				ГОРИЗОНТ-2			
ПРИТОК ЧЕРЕЗ ГРАНИЦЫ:				ПРИТОК ЧЕРЕЗ ГРАНИЦЫ:			
ЗАПАДНАЯ	5435.02			ЗАПАДНАЯ	-154.32		
ВОСТОЧНАЯ	4473.32			ВОСТОЧНАЯ	-655.45		
СЕВЕРНАЯ	5840.86			СЕВЕРНАЯ	549.85		
ЮЖНАЯ	3662.44			ЮЖНАЯ	-1520.65		
ВН.ГР.1 РОДА	.00			ВН.ГР.1 РОДА	.00		
(ВЕРХНИЕ "ОКНА")		.00		(ВЕРХНИЕ "ОКНА")		.00	
(НИЖНИЕ "ОКНА")		.00		(НИЖНИЕ "ОКНА")		.00	
ЕМК. ЗАПАСЫ	.00			ЕМК. ЗАПАСЫ	.00		
ВОДООТБОР	.00			ВОДООТБОР	.00		
ПИТАНИЕ	83281.17	==	83281.17	.00		.00	.00
ПРИТОК ИЗ РЕК	-107928.40			ПРИТОК ИЗ РЕК	.00		
ПРИТОК СВЕРХУ:	.00			ПРИТОК СВЕРХУ:	2014.91		
ПЕРЕТЕКАНИЕ ВВЕРХ		.00		ПЕРЕТЕКАНИЕ ВВЕРХ	-15778.82		
ПЕРЕТЕКАНИЕ СВЕРХУ		.00		ПЕРЕТЕКАНИЕ СВЕРХУ	17793.73		
ПРИТОК СНИЗУ:	-2014.91			ПРИТОК СНИЗУ:	.00		
ПЕРЕТЕКАНИЕ ВНИЗ		-17793.73		ПЕРЕТЕКАНИЕ ВНИЗ		.00	
ПЕРЕТЕКАНИЕ СНИЗУ		15778.82		ПЕРЕТЕКАНИЕ СНИЗУ		.00	
-----				-----			
ДИСБАЛАНС	-7250.45	КУБ.М/СУТ(	3.41%)	ДИСБАЛАНС	234.34	КУБ.М/СУТ(	4.79%)
Приток по участкам рек:				Приток по участкам рек:			
1 УЧАСТОК	-363.0			28 УЧАСТОК	-2731.1		
2 УЧАСТОК	-479.1			29 УЧАСТОК	-852.2		
3 УЧАСТОК	-978.0			30 УЧАСТОК	-8301.1		
4 УЧАСТОК	-2663.0			31 УЧАСТОК	-3009.3		
5 УЧАСТОК	-1279.7			32 УЧАСТОК	-176.0		
6 УЧАСТОК	-1751.7			33 УЧАСТОК	-254.8		
7 УЧАСТОК	-1449.5			34 УЧАСТОК	-514.2		
8 УЧАСТОК	-1902.2			35 УЧАСТОК	-47.1		
9 УЧАСТОК	-4089.5			36 УЧАСТОК	-2604.3		
10 УЧАСТОК	-3271.4			37 УЧАСТОК	-2781.2		
11 УЧАСТОК	-1989.9			38 УЧАСТОК	-32.1		
12 УЧАСТОК	-254.9			39 УЧАСТОК	-6723.9		
13 УЧАСТОК	-1257.7			40 УЧАСТОК	-951.2		
14 УЧАСТОК	-257.7			41 УЧАСТОК	-1522.2		
15 УЧАСТОК	-493.3			42 УЧАСТОК	-445.4		
16 УЧАСТОК	-1336.3			43 УЧАСТОК	-2118.4		
17 УЧАСТОК	-226.6			44 УЧАСТОК	-7552.8		
18 УЧАСТОК	-1143.3			45 УЧАСТОК	-5922.0		
19 УЧАСТОК	-628.3			46 УЧАСТОК	-2995.3		
20 УЧАСТОК	-486.2			47 УЧАСТОК	-7520.7		
21 УЧАСТОК	-228.3			48 УЧАСТОК	-2234.2		
22 УЧАСТОК	-1490.2			49 УЧАСТОК	-2026.6		
23 УЧАСТОК	-2498.4			50 УЧАСТОК	-259.8		
24 УЧАСТОК	-1413.0			51 УЧАСТОК	-374.5		
25 УЧАСТОК	-271.6			52 УЧАСТОК	-1246.5		
26 УЧАСТОК	-4719.4			53 УЧАСТОК	-2614.8		
27 УЧАСТОК	-5194.6						

Таблица 3.8 – Сравнение натурального и модельного притока в реки, тыс. м<sup>3</sup>/сут

Расчетные участки	Название реки	Натурный приток	Модельный приток	Относительная ошибка, %
1-41	р. Рита (с притоками)	75,7	70,9	6,3
42-48	канал Турский	30,97	28,9	6,7

Итоги корректировки модели и сравнения соотношения модельных и натуральных данных по уровням подземных вод приводим на конец 2009 г.

Кроме того, дополнительной целью расчетов при проведении нестационарных задач геофильтрации (эпигнозного моделирования) наряду с проверкой достоверности построения модели являлось:

- определение балансовой структуры водоотбора подземных вод в карьере I очереди отработки месторождения «Хотиславское»;

- оценка современных гидродинамических условий формирования водоносных горизонтов.

По результатам решения нестационарных задач проведено уточнение водоотдачи водовмещающих отложений грунтовых вод, величина которой составила 0,2, а также упругой водоотдачи напорного горизонта верхнемеловых отложений, которая составила соответственно 0,01.

Для проведения эпигнозного моделирования на расчетной модели реализованы условия функционирования карьера в соответствии с планом добычных работ I очереди месторождения «Хотиславское» и данных формирования притока воды (см. рисунок 2.2). В расчетной модели определено, что количество откачиваемой воды из карьера I очереди отработки в 2008-2009 гг. в среднем должно составлять 45 тыс. м<sup>3</sup>/мес, или около 1500 м<sup>3</sup>/сут. Для контроля за прогнозным снижением уровня грунтовых вод в районе границы Беларуси и Украины установлен расчетный (контрольный) блок детального анализа, местоположение которого в расчетной модели адекватно натурному местоположению наблюдательной скважины 1н. Исходное значение уровня грунтовых вод в скважине 1н, полученное по результатам решения обратной стационарной задачи, в контрольном блоке составляет 158,1 м.

Расчеты баланса подземных вод на модели 2007-2009 гг. приведены в **таблице 3.9**. Величина относительной погрешности расчетов не превышает 2,1%.

Анализ результатов эпигнозного моделирования отработки карьера I очереди месторождения «Хотиславское» за 2008-2009 гг. показывает:

Таблица 3.9 – Прогнозный баланс подземных вод по результатам решения нестационарной задачи

****ИТОГОВЫЙ БАЛАНС ПО МОДЕЛИ**** (КУБ.М/СУТ) ГОРИЗОНТ-1							****ИТОГОВЫЙ БАЛАНС ПО МОДЕЛИ**** (КУБ.М/СУТ) ГОРИЗОНТ-2						
ПРИТОК ЧЕРЕЗ ГРАНИЦЫ:							ПРИТОК ЧЕРЕЗ ГРАНИЦЫ:						
ЗАПАДНАЯ				5430.91			ЗАПАДНАЯ				-155.19		
ВОСТОЧНАЯ				4715.47			ВОСТОЧНАЯ				-615.51		
СЕВЕРНАЯ				5860.64			СЕВЕРНАЯ				574.15		
ЮЖНАЯ				3768.57			ЮЖНАЯ				-1513.93		
ВН.ГР.1 РОДА				-1475.19	:		ВН.ГР.1 РОДА				.00	:	
ЕМК.	СЕВ.	ЗАП.	ВОСТ.	ЮЖ.	СН.	СВ.	ЕМК.	СЕВ.	ЗАП.	ВОСТ.	ЮЖ.	СН.	СВ.
0.	-245.	-285.	-535.	-387.	-23.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
				(ВЕРХНИЕ ОКНА)		.00					(ВЕРХНИЕ ОКНА)		.00
				(НИЖНИЕ ОКНА)		.00					(НИЖНИЕ ОКНА)		.00
ВОДООТБОР				.00			ВОДООТБОР				.00		
ПИТАНИЕ			83279.21	==	83279.21	.00	ПИТАНИЕ			.00	==	.00	.00
ЕМК. ЗАПАСЫ				462.33			ЕМК. ЗАПАСЫ				13.78		
ПРИТОК ИЗ РЕК				-104828.60			ПРИТОК ИЗ РЕК				.00		
ПРИТОК СВЕРХУ:				.00			ПРИТОК СВЕРХУ:				1708.00		
				ПЕРЕТЕКАНИЕ ВВЕРХ		.00					ПЕРЕТЕКАНИЕ ВВЕРХ		-15665.78
				ПЕРЕТЕКАНИЕ СВЕРХУ		.00					ПЕРЕТЕКАНИЕ СВЕРХУ		17373.73
ПРИТОК СНИЗУ:				-1708.00			ПРИТОК СНИЗУ:				.00		
				ПЕРЕТЕКАНИЕ ВНИЗ		-17373.73					ПЕРЕТЕКАНИЕ ВНИЗ		.00
				ПЕРЕТЕКАНИЕ СНИЗУ		15665.78					ПЕРЕТЕКАНИЕ СНИЗУ		.00
-----							-----						
ДИСБАЛАНС -4494.64 КУБ.М/СУТ( 2.1%)							ДИСБАЛАНС 11.30 КУБ.М/СУТ( .2%)						
Приток по участкам рек:							Приток по участкам рек:						
1	УЧАСТОК			-363.0			28	УЧАСТОК			-2584.3		
2	УЧАСТОК			-479.1			29	УЧАСТОК			-734.1		
3	УЧАСТОК			-977.2			30	УЧАСТОК			-7828.0		
4	УЧАСТОК			-2663.3			31	УЧАСТОК			-2966.1		
5	УЧАСТОК			-1286.2			32	УЧАСТОК			-169.0		
6	УЧАСТОК			-1657.7			33	УЧАСТОК			-215.9		
7	УЧАСТОК			-1333.4			34	УЧАСТОК			-442.3		
8	УЧАСТОК			-1744.8			35	УЧАСТОК			-19.7		
9	УЧАСТОК			-3759.7			36	УЧАСТОК			-2440.2		
10	УЧАСТОК			-3115.3			37	УЧАСТОК			-2716.4		
11	УЧАСТОК			-1986.8			38	УЧАСТОК			-16.0		
12	УЧАСТОК			-252.5			39	УЧАСТОК			-6701.9		
13	УЧАСТОК			-1228.8			40	УЧАСТОК			-905.0		
14	УЧАСТОК			-243.3			41	УЧАСТОК			-1474.4		
15	УЧАСТОК			-498.2			42	УЧАСТОК			-445.8		
16	УЧАСТОК			-1313.3			43	УЧАСТОК			-2116.6		
17	УЧАСТОК			-220.2			44	УЧАСТОК			-7590.1		
18	УЧАСТОК			-1137.8			45	УЧАСТОК			-5998.6		
19	УЧАСТОК			-630.0			46	УЧАСТОК			-2984.1		
20	УЧАСТОК			-434.6			47	УЧАСТОК			-7632.3		
21	УЧАСТОК			-201.7			48	УЧАСТОК			-2195.9		
22	УЧАСТОК			-1294.2			49	УЧАСТОК			-2104.4		
23	УЧАСТОК			-2411.1			50	УЧАСТОК			-265.0		
24	УЧАСТОК			-1419.1			51	УЧАСТОК			-472.1		
25	УЧАСТОК			-274.7			52	УЧАСТОК			-1312.0		
26	УЧАСТОК			-4689.8			53	УЧАСТОК			-2498.3		
27	УЧАСТОК			-4858.2			54	УЧАСТОК			473.5		

1) При среднем притоке воды в карьер, равном около  $1500 \text{ м}^3/\text{сут}$ , на прилегающих к карьеру территориях формируется локально выраженная депрессия грунтовых вод (снижение уровня грунтовых вод), характер развития которой на конец 2009 г. отражает **рисунок 3.8**.

2) Снижение уровня грунтовых вод в контрольном блоке расчетной модели (район наблюдательной скважины 1н) составляет около 0,4 м.

3) Снижение уровня грунтовых вод в районе государственной границы Беларуси и Украины составляет около 0,1-0,2 м.

4) Снижение уровня напорных вод водоносного горизонта верхнемеловых отложений составляет 0,1-0,2 м (см. рисунок 2.3).

5) Радиус депрессионной воронки, сформированной в грунтовых водах за 2008-2009 гг. отработки карьера по изолинии снижения уровня грунтовых вод 0,5 м составляет около 330 м, по изолинии 0,2 м – 565 м. Общая площадь депрессии грунтовых вод составляет около 1000 га.

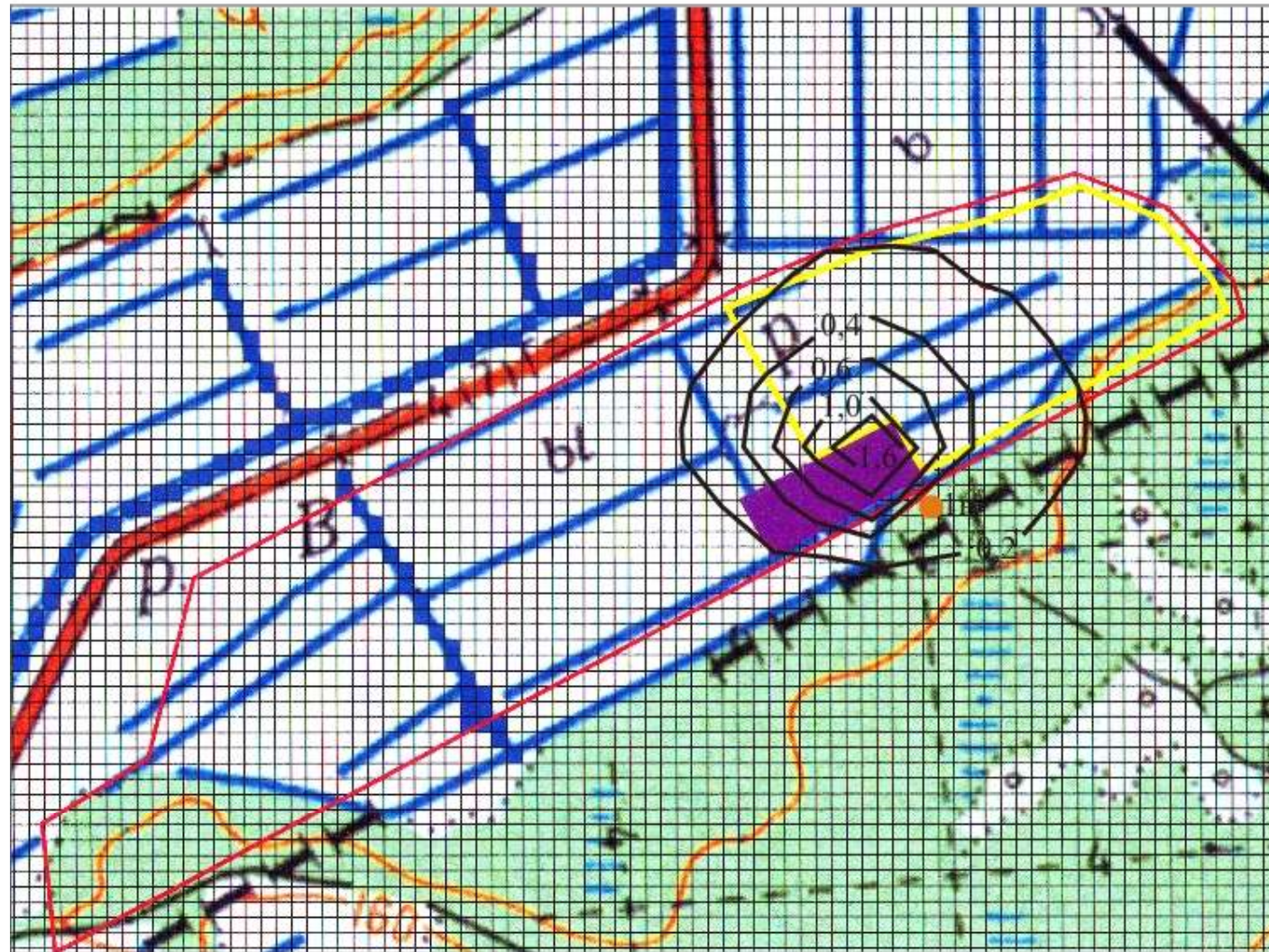
б) Из компенсационного канала, располагаемого между карьером I очереди и границей Беларуси и Украины (см. рисунок 2.1), формируются фильтрационные потери, величина которых ориентировочно равна  $473,5 \text{ м}^3/\text{сут}$  или около  $0,70 \text{ м}^3/\text{сут}$  на 1 п.м. длины канала.

7) Анализ формирования баланса подземных вод в расчетной модели показал, что водоприток в карьер в основном формируется в связи со сработкой емкостных запасов грунтовых вод, составляющей в 2009 г. в среднем около  $462,3 \text{ м}^3/\text{сут}$  (или 30,8 %), сокращения подземной разгрузки в поверхностные водные объекты на прилегающих участках, ориентировочно равной около  $540 \text{ м}^3/\text{сут}$  (или 36 %), упомянутых выше по тексту фильтрационных потерь из компенсационного канала (около 32 %) и перетекания из нижележащего водоносного горизонта верхнемеловых отложений, равного  $23 \text{ м}^3/\text{сут}$  (или 1,5 %).

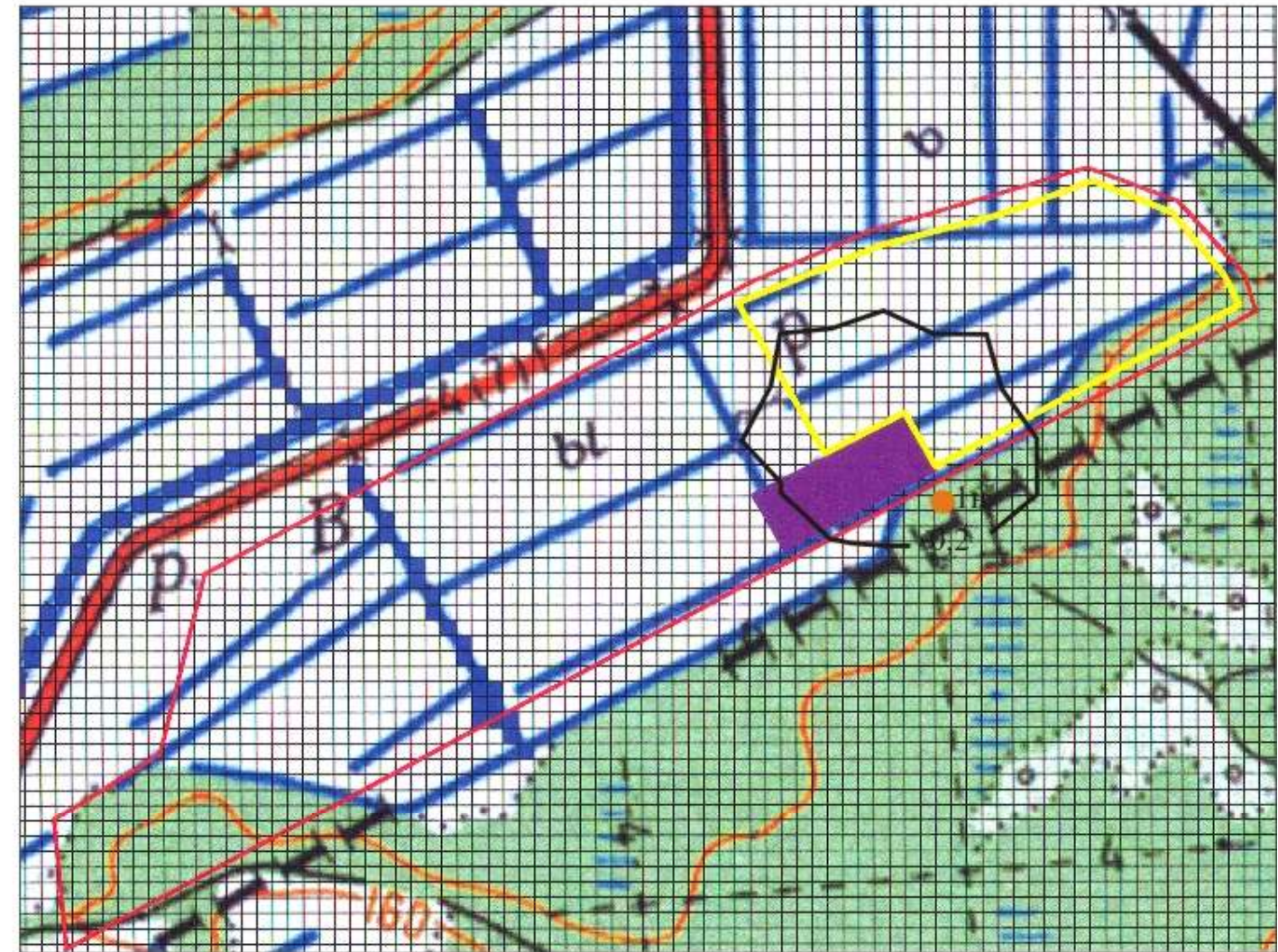
8) Небольшой ( $23 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) приток в карьере напорных вод верхнемелового горизонта очевидно обусловлен отсутствием по состоянию на 2009 г. вскрытия трещиноватой зоны мергельно-меловых пород, залегающих на глубине (в среднем) около 28 м.

9) На основании результатов выполненного эвристического моделирования следует сделать вывод о наличии незначительного (выражающегося в прогнозном снижении УГВ на 0,1-0,2 м в районе государственной границы Украины и Беларуси) по состоянию на 2009 г. влияния эксплуатации карьера I очереди месторождения «Хотиславское» на прилегающую территорию Украины.

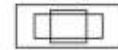
I водоносный горизонт (грунтовые воды)





II водоносный горизонт




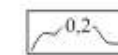
Условные обозначения


 - разбивочная сетка исходной области фильтрации

 - горный отвод №3 от 9.07.2004 г.

 - I очередь отработки месторождения

 - II очередь отработки месторождения

 - снижение уровня подземных вод, м

 - модельные блоки рек и каналов

 - наблюдательная скважина и ее номер

Рисунок 3.8 - Карта-схема прогнозного снижения подземных вод под влиянием эксплуатации карьера I очереди месторождения мела "Хотиславское" по состоянию на конец 2009 г. Масштаб 1:18 000

Анализ полученных при проведении обратных стационарных и нестационарных задач геофильтрации результатов позволяет сделать вывод о правомерности проведенных геофильтрационных построений и достижении соответствующей достоверности модельных и натуральных расходов водоносных пластов на каждом участке исследуемой территории, с точностью, позволяющей выполнять дальнейшие расчеты.