

УДК 504.064.2.001.18

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КАРТ ГИДРОИЗОГИПС НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МОРФОСТРУКТУРЫ РЕЛЬЕФА

Лукин Анатолий Алексеевич

канд. геол.-минерал. наук

Лукин Алексей Анатольевич

канд. геол.-минерал. наук, ст. преподаватель кафедры геофизики
Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: lukin@tpu.ru

Лимарева Анна Алексеевна

специалист отдела мониторинга окружающей среды
ООО «ОЙЛТИМ Экосервис», Россия, 634003, г. Томск,
пер. Телевизионный, 3. E-mail: anuta-lim@mail.ru

Цель исследования – разработка новой методики построения карт гидроизогипс, отражающих с прогнозной точностью структуру фильтрационных потоков при минимальном объеме исходной информации по напорам подземных вод. Актуальность разработки определяется принципиально новым подходом к построению карт на основе детерминированной модели контроля напорного поля водоносных горизонтов – модели морфоструктуры рельефа. Все существующие методы и технологии используют вероятностные модели распределения величин напоров при картировании изопьез. В статье приводятся: формулировки предмета исследования и проблемы, решаемой разрабатываемой методикой; принятое содержание основных понятий; краткая характеристика гидрогеологических условий объекта исследования; постулируемые положения морфоструктурно-гидрогеологического анализа; правила реализации положений в методике построения прогнозной крупномасштабной карты гидроизогипс; карта гидроизогипс, построенная на основе модели морфоструктуры рельефа для участка хозяйственно-питьевого водозабора подземных вод горнорудного предприятия, и оценка её достоверности; сравнительные оценки двух методик составления карт – разрабатываемой и принятых. Главное различие методик – их модельное содержание или основа. Разрабатываемая методика базируется на детерминированной модели обусловленности структуры фильтрационного потока морфоструктурой рельефа, принятые – на вероятностных моделях распределения напоров в точках наблюдения. В разрабатываемой методике положение линейных и площадных элементов структуры фильтрационных потоков, выраженных в напорном поле, задаются неизменными в пространстве и времени моделью морфоструктуры рельефа, в принятых это положение является неопределенным. Различны требования к объему исходной информации, удовлетворяющему тем или иным нормативам точности. При построении карты по разрабатываемой методике точность отражения структуры фильтрационного потока и пространственного распределения характеристик его напорного поля определяется конечным и незначительным числом скважин. Для получения такой же точности карт с построением по принятым методикам требуется объем исходной информации в разы больший.

Ключевые слова:

Грунтовой водоносный горизонт, карта гидроизогипс, морфоструктурно-гидрогеодинамическая методика, структура фильтрационного потока, морфоструктура рельефа, деформация гидродинамической сетки, ортогональная волновая модель, прямая и обратная гидрогеофизические задачи.

Предмет исследования, решаемая проблема, исходные понятия

Цель исследования, решаемая проблема. За последний ряд десятилетий мы не находим опубликованных исследований, специально посвященных разработке методики построения карт гидроизогипс. Сошлемся только на учебную литературу [1], где наиболее полно излагается общепринятая в настоящее время методика. Так как для студентов предусматривается «рукопашный» вариант ее использования, то в методике оговариваются условия грубых ошибок при формальном ее применении. Главные из этих условий: учет форм рельефа, на которых находятся соседние скважины при интерполяции изменения напоров между ними, а также отметок естественных водопоявлений (уездов рек и озер, родников и др.).

При построении карт гидроизогипс, как и при построении любой сложной геологической поверх-

ности, используются принципы и методы геометрии недр. Они, в свою очередь, основываются на принципах и методах аналитической геометрии и других разделов математики. В современных программных комплексах компьютерных технологий отражения разнообразных геофизических и геохимических полей реализован не только линейный принцип интерполяции, но и вероятностные модели распределения величин измеряемых параметров.

В связи с предыдущим обозначим цель и предмет нашего исследования: разработка методики отражения модели морфоструктуры рельефа, заданной горизонталями его поверхности на топографической карте необходимого масштаба и дифференцируемой определенными элементами морфоструктуры, в структуре грунтового фильтрационного потока, выраженной изолиниями равных напоров зеркала грунтовых вод при построении карты гидроизогипс в условиях ограничен-

ной исходной информации по уровням подземных вод в скважинах. Будем называть методику морфоструктурно-гидрогеодинамической.

Разрабатываемая морфоструктурно-гидрогеодинамическая методика является инструментом решения проблемы изучения и отражения структурной взаимосвязи следствия (потоков грунтовых вод) причиной (рельефом земной поверхности). Но рельеф как причина также контролирует (структурирует) распределение солнечного тепла, воздушные потоки, атмосферные осадки, фации пород зоны аэрации, типы почв и растительность, то есть все внешние природные условия формирования теплового и водного баланса и инфильтрационного питания грунтовых водоносных горизонтов. Таким образом, карты гидроизогипс, построенные по морфоструктурно-гидрогеодинамической методике, прямо отражают общую природную структуру питания и перетекания между горизонтами и прямо решают задачу количественной оценки и пространственной дифференциации структуры водного баланса фильтрационного потока [2]. Из этого следует принципиальное отличие в использовании двух типов карт, полученных по разрабатываемой и общепринятой методикам, в качестве основы для расчетных схем. Карты первого типа решают прямую гидрогеофизическую задачу – выражение в структуре и характеристиках напорного поля (термин «напорное поле» или «напорное гидрогеодинамическое поле водоносного горизонта» нами используется по аналогии с терминами «поле пьезометрических напоров» или «поле давлений подземных вод», которые ввел Н.А. Огильви [3]), морфоструктуры рельефа, заданного его моделью. Гидродинамические расчеты на основе карт гидроизопьез, построенных по общепринятой методике, в том числе с использованием компьютерных технологий и вероятностных моделей, могут решать только обратные задачи. Отмеченные различия в своей общей основе соответствуют понятиям и принципу разделения прямых и обратных задач, принятых в гидрогеодинамике [4] и геофизических методах разведки МПИ [5].

Принятое содержание основных понятий. Ключевыми понятиями при разработке методики являются гидрогеодинамическая структура фильтрационного потока и морфоструктура рельефа.

Структуру фильтрационного потока математически и физически формально определяют как положение вектора скорости фильтрации в пространственных координатах [4, 6, 7]. В математическом анализе и исчислении потоков, соответственно, различают одно- (линейные) и двух- (плоские: плановые и профильные) и трехмерные потоки. Структура и мерность потока определяются особенностями деформации гидродинамической сетки движения потока – линий равного напора и линий тока.

В морфоструктурно-гидрогеологическом анализе [2] сложные трехмерные деформации гидродинамических сеток фильтрационных потоков, заданных картами гидроизогипс и гидроизопьез, мы

классифицируем и районируем на основе ортогональной волновой модели. В модели выделяются четыре типа потоков. Исходя из технологии выделения типов, *под гидрогеодинамической структурой фильтрационного потока будем понимать систему взаимосвязанных пространственных элементов потока, различающихся знаком кривизны поверхности напорного поля по ее простиранию и падению и характером потоков (расходящиеся–сходящиеся, нисходящие–восходящие)*. Структуру потока в пространственных элементах формируют линейные элементы поверхности напорного поля: 1) линии перегиба поверхности в ортогональных направлениях (линейные границы пространственных типов) и 2) гребневые и подошвенные (килевые) линии напорной поверхности (линейные источники и стоки фильтрационных потоков).

Морфоструктура рельефа. Понятие о морфоструктурах как выражении «геологических явлений, взаимодействующих с географическими» или как об орографически и тектонически целостных (единых) образованиях было введено И.П. Герасимовым [8]. В геоморфологии возникло и быстро развивалось новое направление – структурная геоморфология [9], предметом изучения которой являются морфоструктуры рельефа. В терминологическом справочнике по структурной геоморфологии и неотектонике [10] приводится уже 28 определений понятия «морфоструктура». Эти определения отражают общий содержательный смысл взаимосвязи морфологии рельефа с геологическими структурами, который обозначен в определении И.П. Герасимова, и не могут использоваться в конкретном методическом приложении при решении задач оценки структурного взаимодействия рельефа и фильтрационных потоков подземных вод. *Поэтому морфоструктуру рельефа, в соответствии с нашей методикой ее отражения, будем определять как системное единство и взаимосвязь линейных и площадных форм (элементов), причинно определяющих структуру распределения водных (поверхностных и подземных) и литопотоков.* При этом линейные и площадные элементы поверхности рельефа классифицируются и выделяются также на основе ортогональной волновой модели. То есть картографически в морфоструктуре рельефа показываются водораздельные и тальвеговые (гребневые и килевые) линии и линейные границы площадных форм, разделяющие их на четыре типа по сочетанию знака кривизны поверхности рельефа по простиранию и падению (горизонталям и градиентным линиям). *Карта же морфоструктуры рельефа, представленная этими элементами, используется далее как морфоструктурная модель рельефа в разрабатываемой морфоструктурно-гидрогеодинамической методике построения карт гидроизогипс и гидроизопьез водоносных горизонтов.*

Таким образом, «морфоструктура рельефа» в нашем понимании и употреблении не несет содер-

жательного смысла, который вкладывается в него в структурной геоморфологии, но характеризует рельеф как самостоятельную систему со свойственной ему структурой. В этом отношении приведенное нами определение «морфоструктура (или морфологическая структура) рельефа» аналогично понятиям «структура земной поверхности (ЗП)» [11] или «структура рельефа ЗП» [12] в геоморфологии.

Последнее замечание к использованию терминов и понятий при разработке методики. Как известно, поверхность напорного поля гравитационных фильтрационных потоков гидростатической природы отражает рельеф земной поверхности опосредованно. Даже для верхних (грунтовых) водоносных горизонтов карты гидроизогипс имеют более сглаженные формы, чем топография рельефа соответствующего масштаба. Поэтому в нашей методике морфоструктурная модель рельефа чаще строится не на основе поверхности рельефа, отраженной на топографической карте, а на основе *структурных поверхностей рельефа* того или иного порядка. Методики их построения разрабатываются в морфометрии рельефа (направление геоморфологии). К структурным поверхностям относятся, например, базисные и вершинные поверхности [13]. Первые нами широко используются при построении карт гидроизогипс и гидроизопьез [2].

Характеристика объекта исследования

Местоположение и общие условия. Объектом нашего исследования является район горнорудного предприятия, занимающегося разработкой и обогащением руд месторождения золота, а при построении карты гидроизогипс – участок подземного водозабора предприятия. Положение района в общем плане: в географическом и административном – Восточный Казахстан; в геологоструктурном и рудноформационном отношениях – Алейская подзона Рудно-Алтайской структурноформационной зоны; в морфоструктурном плане – западное низкогорье Ульбинского хребта Горного Алтая; гидрографическая система – приводораздельные бассейны малых рек бассейна р. Ульба, правобережного притока Иртыша. Положение района в системе регионального гидрогеологического районирования [14] – западная часть Алтайской гидрогеологической складчатой области. Водовмещающие породы – осадочные, осадочно-вулканогенные и интрузивные образования герцинских складчатых структур. Рыхлые отложения в геологическом и гидрогеологическом строении района имеют подчиненное значение и незначительные мощности.

Отмеченные общие условия определяют главные черты в формировании структуры фильтрационных потоков подземных вод района и участка. Геологическое строение обуславливает господство трещинных коллекторов, трещинных типов подземных вод и трещинных систем фильтрационных потоков. Среди них различают грунтовые потоки трещиннопластовых вод в зоне трещиноватости выветривания и потоки напорных трещинножилых

вод в проницаемых зонах разломов и линейной трещиноватости разнообразного генезиса. Первые развиты на водораздельных (междуречных) пространствах и являются питающими системами. Вторые системы, дренирующие (расходующие) фильтрационные потоки, способствуют формированию и развитию долин ручьев и рек, поскольку фильтрационный поток, собираясь в проницаемую систему дренажа, «вынужден» подниматься вверх, выходить на дневную поверхность и переходить в поверхностный водоток. Формируется аллювий, а в обводненной части аллювиальных отложений – поровопластовые потоки подземных вод. В районе их распространение ограничено из-за условий развития бассейнов водосбора малых рек.

В заключение общей характеристики сформулируем одно из базовых положений морфоструктурно-гидрогеодинамической методики отражения на картах гидроизогипс и гидроизопьез структуры фильтрационных потоков: *структура фильтрационного потока в определенном выше содержании является неизменной в геологическом пространстве и времени.*

Данные по морфометрии, климату и общему водному балансу. Эти данные определяют характеристики фильтрационных потоков – напоры, напорные градиенты, скорости и расходы потоков.

Рельеф района низкогорный с абсолютными отметками 400–600 м. Углы поверхностей склонов изменяются от 30° в прирусловых зонах речных долин до 5° в приводораздельных частях бассейнов. Отвечающие им градиенты уклонов находятся в пределах 0,1–0,6. Градиенты уклонов русел рек на участке укладываются в интервал 0,02–0,05. Отмеченные уклоны рельефа определяют граничные значения гидравлических уклонов трещинных грунтовых фильтрационных потоков в соответствующих структурных элементах. В области питания и транзита гидравлические уклоны не могут быть больше уклонов водоразделов и склонов, в области разгрузки градиенты потоков не могут быть меньше уклонов дренирующих русел рек.

Климат исследуемого района резко континентальный, среднегодовая температура воздуха 3 °С, около 5 месяцев температура не поднимается выше 0 °С (конец ноября – начало апреля). В этот период подземные воды не получают инфильтрационного питания. Атмосферные осадки (данные по ним, испарению и стоку взяты с «Карт основных элементов водного баланса...» [15]) в пределах 500–600 мм, среднеголетняя величина испарения с поверхности суши 400–420 мм. Основная доля испарения – в летнее время, поэтому и в этот период роль инфильтрационного питания грунтовых вод незначительна. Среднеголетняя величина водного стока малых рек района составляет 140–150 мм, доля в нем подземного стока 60–70 мм. Климатические особенности формирования общего водного баланса определяют характер годового режима уровней грунтовых вод района (рис. 1).

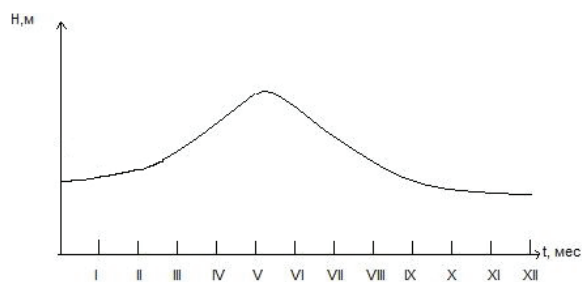


Рис. 1. Типовой график колебания уровня грунтовых вод в наблюдательных скважинах в годовом цикле для климатических условий региона [15]

Fig. 1. Typical curve of groundwater level fluctuation in observation wells in annual cycle for climatic conditions of the region

В учении о режиме подземных вод [4, 16, 17] обоснована закономерность: типовой график уровня колебательного спектра является общим (эталонным) для всей территории природной провинции и отражает однотипное влияние климатических режимообразующих факторов на колебательный режим. На основе этой закономерности сформулируем второе положение (постулат), на котором базируется методика: *гидрогеодинамический режим уровней подземных вод ни в годовом, ни в многолетних циклах колебаний не влияет на пространственную структуру фильтрационных потоков, изменяя только его количественные характеристики в пределах выделенных морфоструктурных элементов.*

Исходный материал, характеристика участка. Участок водозабора подземных вод горнорудного предприятия, для которого нами построена модель морфоструктуры рельефа и крупномасштабная карта гидроизогипс (рис. 2), находится на правобережном склоне бассейна р. Волчовки. Площадь участка в обозначенных границах около 0,23 км². В качестве модели рельефа при построении карты используется топооснова 1:2000 масштаба. Специальные топографические работы для предприятия выполнены в 2009 г. на значительно большей территории, включающей все его объекты.

Водозабор (одиночная скважина в центре участка, рис. 2) морфологически приурочен к основанию горного склона вблизи долины р. Волчовки. Расстояние до речки 50 м. Высшая водораздельная отметка бассейна речки 625 м расположена в 1200 м к северо-востоку от скважины. Абсолютные отметки русла речки изменяются на участке от 466 до 472 м. Отметка устья водозаборной скважины 478,27 м. Общая площадь правобережной части бассейна стока р. Волчовки равна около 2,5 км². Вероятная водосборная площадь водозабора при формировании депрессионной воронки 0,66 км². На этой площади формируются эксплуатационные запасы водозабора за счет естественных ресурсов подземных вод.

Местоположение водозаборной скважины обосновано результатами специальных поисково-разведочных работ, выполненных для горнорудного

предприятия в 2009 г. Работы включали: дешифрирование аэрофотоснимков масштаба 1:30000; маршрутное гидрогеологическое обследование; геофизические работы для оценки трещиноватости по характеру неоднородности магнитного поля. На основе предыдущего задано и пробурено две поисково-разведочные скважины глубиной 35 м. По результатам опытно-фильтрационных работ лучшая по производительности скважина была разбурена как разведочно-эксплуатационная и в дальнейшем оборудована в качестве водозаборной (рис. 2). Вторая скважина находится за пределами поля карты на юго-запад от водозаборной в 164 м.

Составители: А. А. Лимарева,
А. А. Лукин, 2010 год

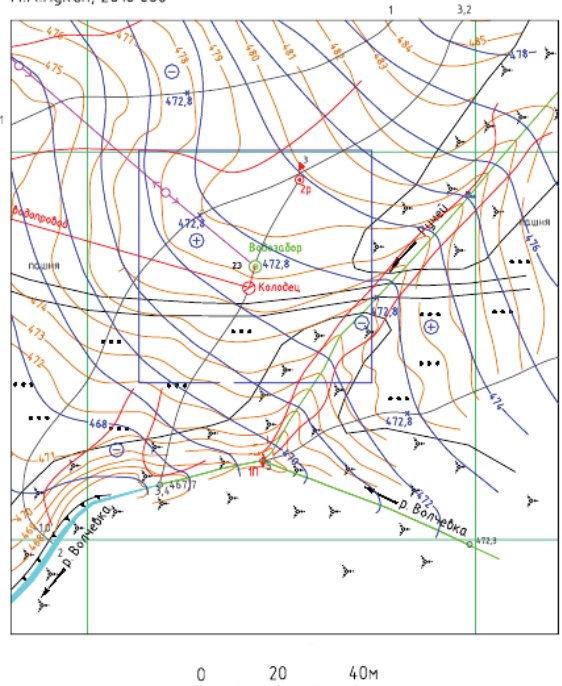


Рис. 2. Модель морфоструктуры рельефа и карта гидроизогипс участка водозаборной скважины горнорудного предприятия (пояснения в тексте)

Fig. 2. Model of a relief morphostructure and depth-to-water map of the area of mining enterprise water well (explanation is in the text)

Геологическое и гидрогеологическое строение юго-западного склона в пределах участка карты характеризует геолого-технический разрез эксплуатационной скважины (рис. 3). По выделенным и задокументированным при бурении слоям и горизонтам его можно принимать как типовой разрез горного склона. Меняются только мощности рыхлых образований в зависимости от строения морфологических элементов структуры поверхности склона и особенностей трещиноватости границ. Разрез по данным бурения двух скважин характеризуется следующей последовательностью залегания горизонтов, составом пород и пределами в изменении мощностей (в скобках – номера слоев, показанных на рис. 3): сверху, под почвенным сло-

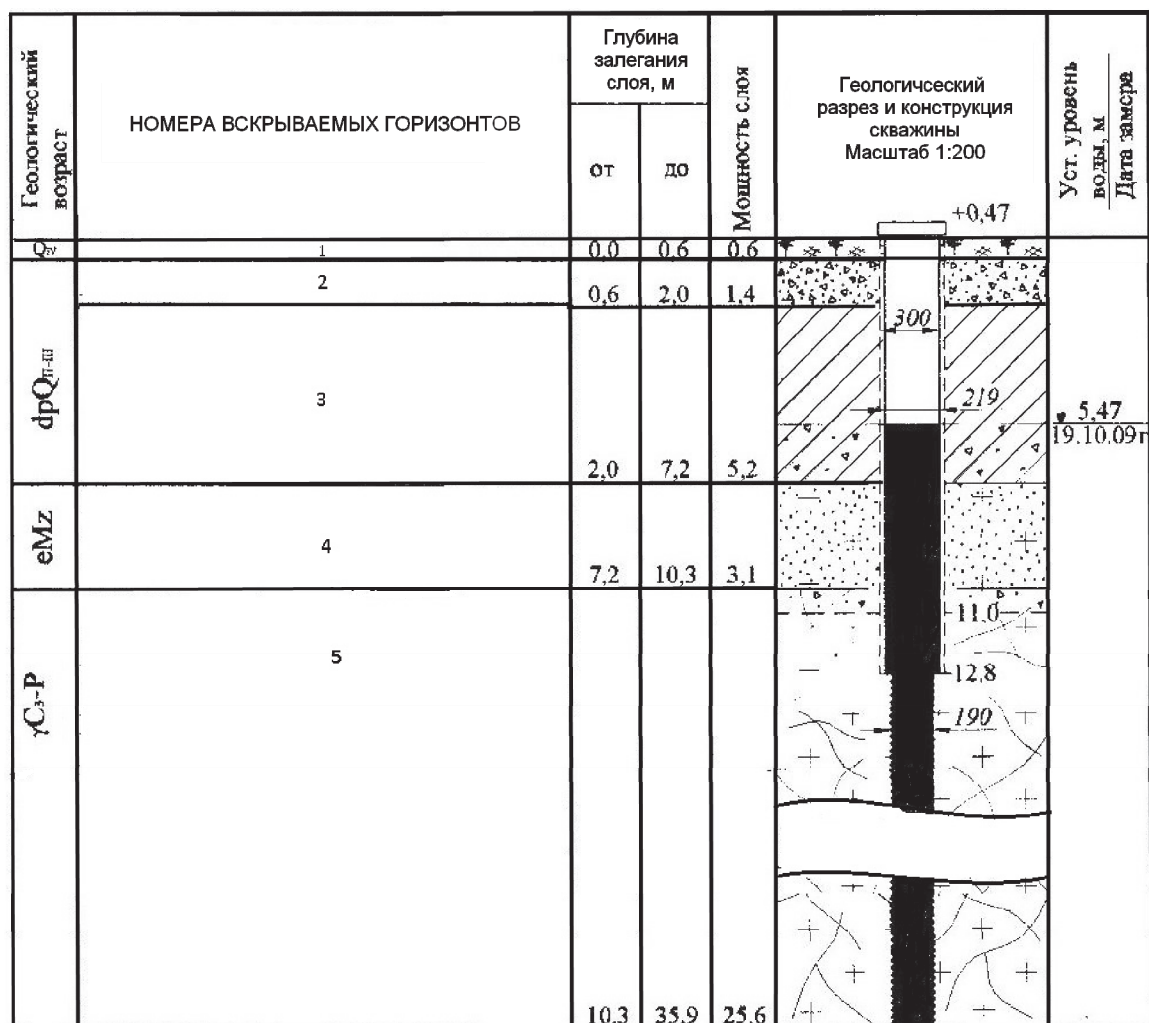


Рис. 3. Геолого-технический разрез эксплуатационной скважины (литологическое описание горизонтов дается в тексте)

Fig. 3. Geological and technical section of the production well (lithological description of horizons is introduced in the text)

ем (1), залегают щебенисто-песчаные с супесчаным заполнителем делювиально-пролювиальные отложения до 2 м толщиной (2); ниже (3) макропористые суглинки с дресвой и щебнем мощностью 3,5–5,2 м; далее (4) вскрываются элювиальные образования по гранитам мощностью 1–3,1 м (песок желтовато-серый средней крупности со структурой гранитов); ниже элювия до забоя скважин (5) – трещиноватые граниты.

В эксплуатационной скважине проведена опытная откачка при двух понижениях. При понижении $S=13,55$ м (47 часов) получен расход $Q=3,6$ дм³/с, при втором понижении 9,68 м (48 часов) – 2,6 дм³/с. График $Q(S)$ имеет прямолинейную зависимость, отражая напорный характер водоносного горизонта. То есть водоносный горизонт в зоне трещиноватости выветривания гранитов, который по условиям залегания может быть отнесен только к грунтовому типу, из-за строения верхней рыхлой части разреза (рис. 3) и структуры потока в нижней части горного склона долины, приобретает здесь местные гидростатические напоры на кровлю.

Скважина с большим резервом обеспечивает заявленную потребность в воде (30 м³/сут= $0,35$ дм³/с).

Итак, участок составления карты гидроизогипс характеризует фильтрационный поток в грунтовом водоносном горизонте, представленном трещиноватыми гранитами в зоне их выветривания. Структура потока отражает условия в нижней части горного склона долины р. Волчовки. В системе классического разделения горизонтов на области питания, транзита и разгрузки – это область транзита и начинающейся частичной разгрузки подземных вод горизонта, где он приобретает черты напорного. Информация по уровням (напорам) фильтрационного потока ограничивается одной скважиной и отметками уреза воды в р. Волчовка, как отметками грунтового потока подземных вод в области их полного дренирования речкой. Исходя из данных рис. 3, отметка установившегося уровня воды в скважине принимается 472,8 м. При таком объеме исходной информации по уровням оказывается невозможным использование как традиционной методики, так и компьютерных техноло-

гий построения карт гидроизогипс. Разрабатываемая морфоструктурно-гидрогеодинамическая методика позволяет построить прогнозную карту гидроизогипс на основе имеющейся минимальной информации. В качестве основы такой карты выступает морфоструктурная (морфолгическая) модель рельефа. Она строится с использованием топографической карты 1:2000 масштаба, которая является неотъемлемой информационной базой методики.

Методика построения карты гидроизогипс базируется на ряде положений, постулирующих обусловленность отражения структурных элементов морфологии рельефа как причины в структурных элементах фильтрационного потока как следствия.

Исходные положения методики

Методика основана на следующих положениях (постулатах) морфоструктурно- гидрогеологического анализа [2].

1. Поверхность зеркала грунтовых вод, как правило, находится ниже земной поверхности и совпадает с последней в ландшафтно-морфологических элементах низинных болот, русел ручьев и рек, поверхностных водоемов.
2. Структура фильтрационного потока грунтового водоносного горизонта полностью контролируется морфологической структурой рельефа. Гидродинамическая структура фильтрационного потока, заданная в определенном масштабе картой гидроизогипс, подробно отражает (как следствие причину) морфологическую структуру рельефа, заданную или горизонталями топографической карты того же масштаба, или изогипсами структурных поверхностей рельефа (например, базисных обоснованного порядка) [13].
3. Горизонтальные проекции гребневых (водораздельных) и килевых (талвеговых) линий морфологической структуры рельефа и поверхности «зеркала» грунтовых вод совпадают. Для постоянно функционирующих водотоков линии урезов их русел и килевые линии поверхности зеркала грунтовых вод совпадают также в вертикальной проекционной плоскости.
4. Горизонтальные проекции линейных границ площадных форм по знаку кривизны поверхности модели морфоструктуры рельефа или его структурных поверхностей и подобных им форм поверхности зеркала грунтовых вод также совпадают.
5. Гидравлические уклоны потоков грунтовых вод, как правило, меньше уклонов поверхности рельефа и совпадают с последними в дне речных долин, где в отмеченных ландшафтно-морфологических элементах происходит слияние этих поверхностей, и близки с ними в зонах водораздельных линий рельефа. Природа гидравлических грунтовых потоков не допускает уклонов больших, чем уклоны поверхностей рельефа, под которыми находится грунтовый водоносный горизонт.
6. Гребневые (водораздельные) линии модели морфоструктуры рельефа определяют плановое положение линейного источника (питания) грунтового потока; тальвеговые (руслые урезы) линии – положение линейного стока (дренирования, полной разгрузки) грунтового потока.
7. Если поверхности зеркала грунтовых вод и рельефа по гребневым и килевым линиям не совпадают по высоте, то глубина уровня грунтовых вод будет меньше в «талвеговой» плоскости вертикального сечения, чем в сопряженной с ней «водораздельной».

Правила реализации положений в методике построения карты гидроизогипс

На основе приведенных исходных положений методика построения карты гидроизогипс включает следующие правила и последовательность их применения:

1. На топографической карте по рисунку горизонталей рельефа проводятся основные водораздельные (гребневые) и тальвеговые (килевые) линии. На рис. 2 они обозначены цифрами на концах: две килевые (1–1, 4–4) и три гребневые (2–2, 3–3, 5–5).
2. В горизонталях рельефа находятся точки перегиба, разделяющие их на отрезки, противоположные по знаку кривизны. Последовательно соединяя точки перегиба в соседних горизонталях, получаем линейные границы положительных (выпуклых) и отрицательных (вогнутых) морфоструктур в поверхности рельефа по ее «простирацию». На рис. 2 они разделяются штриховыми линиями и индексируются кружками со знаками «+» и «-». Выделенные по правилам 1 и 2 линии формируют линейный каркас модели морфоструктуры рельефа. Он задает и определяет плановую структуру фильтрационных потоков грунтового водоносного горизонта, разделяя их на два типа: расходящиеся и сходящиеся.
3. На гребневые и килевые линии сносится местоположение условных скважин, в которых уровень грунтовых вод прогнозируется на отметке уровня в водозаборной скважине (472,8 м). Если реальная скважина вскрывает водоносный горизонт между гребневой и килевой линиями (область транзита), то правило снесения (на основе седьмого положения): на килевые линии – на более низкие отметки, чем отметка устья скважины (478,3 м); на гребневые линии – совпадающие или более высокие отметки (рис. 2).
4. По выделенным линиям 1–1, ..., 5–5 в вертикальной плоскости, заданной осями Н–L (Н – высота, отметка горизонтали, которую пересекает линия; L – длина линии по сумме отрезков между горизонталями) строятся гипсометрические профили (рис. 4). Предыдущее правило проиллюстрировано на профилях в вертикальной проекции.

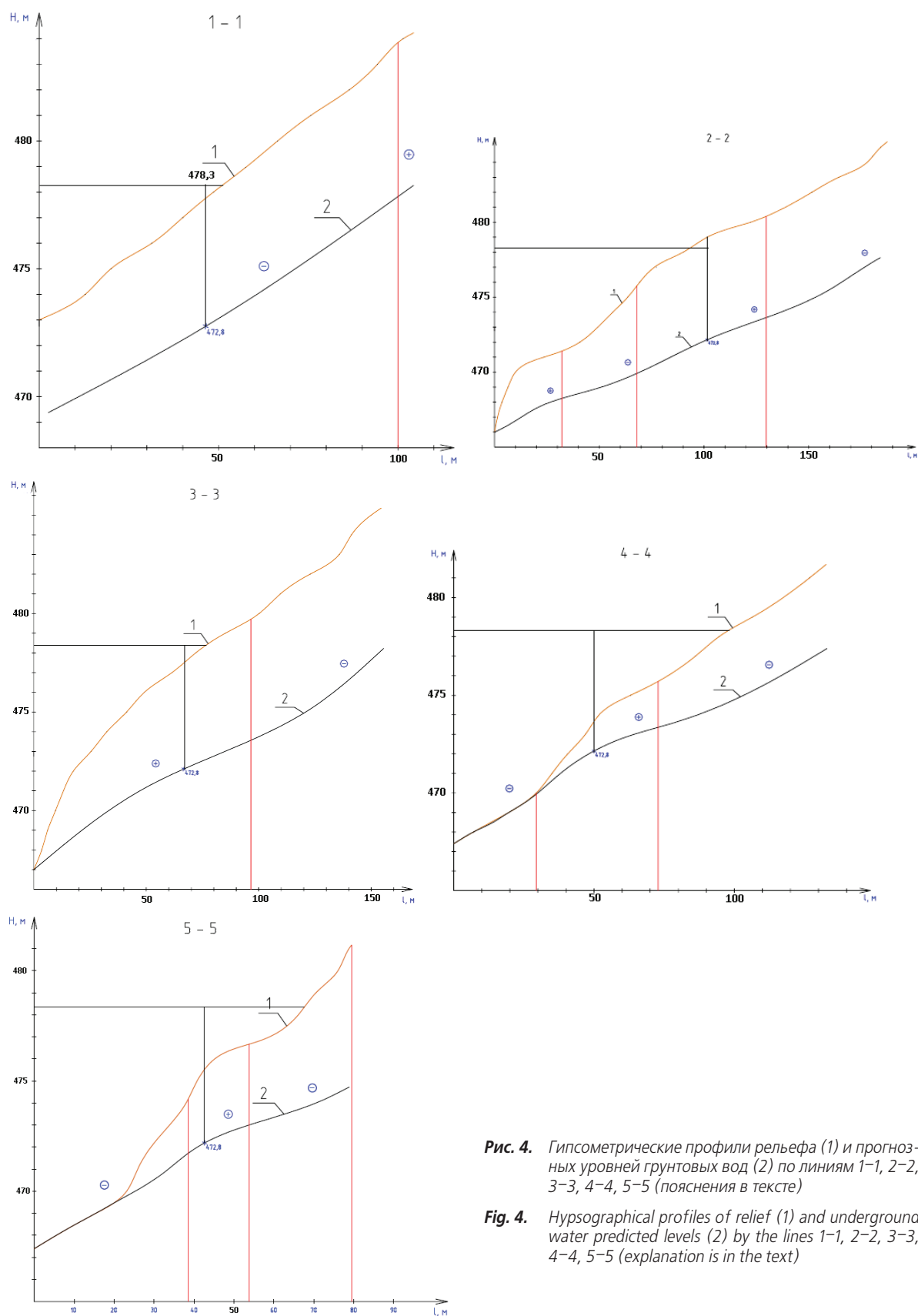


Рис. 4. Гипсометрические профили рельефа (1) и прогноз-ных уровней грунтовых вод (2) по линиям 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5 (пояснения в тексте)

Fig. 4. Hypsographical profiles of relief (1) and underground water predicted levels (2) by the lines 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5 (explanation is in the text)

5. На гипсометрических линиях профилей поверхности рельефа находятся определяющие точки перегиба, которые разделяют их на отрезки с положительной (выпуклой) и отрицательной (вогнутой) кривизной линии, которые обозначены знаками «+» и «-» в кружочках. Через эти точки проводятся ординатные вертикальные линии (рис. 4). Они являются геометрическим местом точек, разграничивающих на линии уровня грунтовых вод отрезки, подобные по знаку кривизны отрезкам на линии профиля рельефа. Это, согласно второму постулируемому положению, способ разделения профильной структуры фильтрационных потоков также на два типа – нисходящие и восходящие.
6. В координатах гипсометрических графиков $H(L)$ выносятся точки уровней грунтовых вод в условных скважинах с отметкой 472,8 м, по проекции и подобию соответствующие отметке уровня в эксплуатационной скважине.
7. На гипсометрических графиках проводятся прогнозные линии уровней грунтовых вод, отражающие формы линий рельефа по кривизне (точки перегиба должны находиться на выделенных ординатных линиях), то есть вычерчиваются линии уровней, субпараллельные линиям рельефа с несколько меньшими уклонами. Обязательность выполнения двух положений – подобия (второе) и меньших уклонов (пятое) – иногда требует смещения условной скважины по оси L .
8. Точки на линиях уровней грунтовых вод (рис. 4) с отметками гидроизопьез строящейся карты переносятся на соответствующие гребневые и килевые линии топоосновы (рис. 2) и оцифровываются значениями отметок.
9. Через одновысотные точки последовательно проводятся линии гидроизогипс, соблюдая правило подобия (согласно постулируемым положениям 2 и 4) знака их кривизны знаку кривизны горизонталей в границах выделенных положительных и отрицательных элементов морфоструктуры рельефа (правило 2 методики).
10. Каждая новая скважина, вскрывшая водоносный горизонт с высотной привязкой установившегося уровня подземных вод, встраивается по приведенным правилам методики в структурную модель рельефа, не изменяя плановых границ ее структурных элементов. Меняется (уточняется) только высотное положение гребневых и килевых линий на гипсометрических профилях соответствующих структурных линий рельефа.

Общая оценка достоверности построенной карты

Построенная карта по своему информационно-му и содержательному наполнению является прогнозной. Оценку ее достоверности можно дать в двух отношениях: 1) природная объективность и достоверность выделенных структурных элементов фильтрационных потоков согласно их понима-

нию и определению; 2) точность полученных на карте характеристик потока (значений напоров и напорных градиентов) в его площадных структурных элементах.

1. Методика построения карты базируется на положениях, постулирующих обусловленность структурной организации фильтрационных потоков водоносных горизонтов как следствия и морфоструктурой рельефа как причины. Эти постулаты не противоречат известным взаимосвязям и закономерностям, выявленным в инженерной, региональной и общей гидрогеологии, геоморфологии, неотектонике и четвертичной геологии. В методике используется однотипный подход к структурированию как земной поверхности (рельефа), так и поверхности напорного поля фильтрационных потоков. Отражением взаимодействия этих систем в их причинной связи является структурное подобие выделяемых в них элементов. В методике построения карт гидроизогипс это отражение определяется критерием геометрического подобия знаков кривизны поверхностей напорного поля и рельефа. Достоверность же выделения структурных элементов фильтрационных потоков на карте гидроизогипс определяется только достоверностью исходной топографической основы, точностью и достоверностью показанных на ней форм земной поверхности и, соответственно, адекватностью отражения в морфологической модели рельефа. Основное условие тождественности отражения – соответствие масштаба карты гидроизогипс масштабу топографической основы по нормативным требованиям. В нашем случае при построении карты гидроизогипс 1:2000 масштаба использована топооснова того же масштаба. Таким образом, построенная карта гидроизогипс объективно и достоверно отражает структуру фильтрационного потока в формах напорной поверхности водоносного горизонта.
2. О точности значений характеристик фильтрационного потока, отраженных на карте. Предельно малый объем исходной информации по уровням подземных вод (одна скважина), который используется при построении карты, является источником ошибок числовых значений напоров и напорных градиентов, характеризующих любую точку карты. По природным взаимосвязям карта верно отражает пространственное положение главных элементов структуры потоков – линейных источников и стоков, связанных с гребневыми и килевыми линиями рельефа. Последние определяют граничные значения градиентов напоров в вертикальных сечениях этих линий, больше или меньше которых «запрещает» природа взаимодействия этих систем. Поэтому и значения напорных градиентов на площади карты между гребневыми и килевыми линиями уровенной поверхности не могут значительно отличаться от истинных.

Назначение карт, примеры использования

Отметим два направления использования карт гидроизогипс и гидроизопьез, построенных по морфоструктурно-гидрогеодинамической методике: 1) обоснование программ и проектов гидрогеоэкологического мониторинга водозаборов подземных вод и других горнотехнических систем; 2) решение прямых гидрогеодинамических и гидрогеофизических задач.

1. Основные задачи гидрогеоэкологического мониторинга водозаборов связаны с контролем и прогнозом изменения количества и качества подземных вод при их эксплуатации. Эффективность решения этих задач определяется правильно размещенной наблюдательной сетью за подземными и поверхностными водами. Первоосновой проектирования и размещения наблюдательной сети локального (производственного) мониторинга водозаборов являются карты гидроизогипс и гидроизопьез эксплуатируемых горизонтов, отражающих природную структуру фильтрационных потоков и условия развития депрессионных воронок [18]. Использование приведенной на рис. 2 карты как основы при обосновании размещения наблюдательной сети в зоне санитарной охраны водозабора горнорудного предприятия описано в наших работах [19, 20].
2. Главные гидрогеодинамические и гидрогеофизические задачи, решаемые с использованием карт гидроизогипс и гидроизопьез, построенных по новой методике, связаны с оценками пространственной (волновой) структуры основных характеристик водного баланса водоносных горизонтов. При этом открываются новые перспективы решения двух важных проблем: проблемы водообмена и проблемы предельных границ распространения вредных компонентов от источников загрязнения разнообразного происхождения, контролируемых границами природных водообменных систем.

Подход к решению задач по обеим проблемам базируется на использовании в качестве расчетной схемы гидродинамической сетки планового фильтрационного потока (условное разделительное название – плановая сетка). Исходная основа сетки – масштабная геометрическая модель напорного поля горизонта, отраженная картой гидроизогипс или гидроизопьез. Градиентные линии поля, ограничивающие ленты тока и оформляющие сетку, проводятся перпендикулярно к изолиниям напоров с некоторой заданной равномерностью. Для плановых сеток боковые границы лент тока в горизонте являются «непроницаемыми» и относятся ко второму роду граничных условий, а границы на поверхностях кровли и подошвы – к граничным условиям третьего рода и описываются расходом или модулем перетекания через разделяющие водоупоры. В связи с этим в лентах плановых сеток расход потока закономерен, в соответствии с выделенными (согласно волновой модели) элементами

структуры потока, увеличивается или уменьшается от отсека к отсеку [2].

Открываются новые возможности решения многообразных воднобалансовых задач. Теоретически, методически и практически перспективна гидрогеофизическая постановка и решение этих задач. Она предполагает выявление и изучение волновой структуры элементов водного баланса в пространстве и времени в единстве латерального (пластового) и вертикального (межпластового) типов водообмена, а также количественную раздельную оценку периодов и частот водообмена этих двух типов.

Решение задач водного баланса и водообмена на основе плановой гидродинамической сетки напорного поля, типизированного элементами структуры ортогональной волновой модели, дано в общем виде на уровне логики элементарной математики в работе [2]. В нашей же работе [21] впервые, на основе введенного воднобалансового коэффициента остаточного загрязнения (изменяется от 1 до 0), обоснованы предельные границы распространения жидких промышленных отходов от полигона захоронения. Эти границы обусловлены природной структурой фильтрационных потоков, определяемых ею водообменными системами и водным балансом горизонта.

Итак, карты гидроизогипс и гидроизопьез, построенные по новой морфоструктурно-гидрогеодинамической методике, позволяют более эффективно и достоверно решать ключевые задачи геоэкологии при эксплуатации горнотехнических систем. Новые методические возможности карт определяются достоверностью отражения на них структуры фильтрационных потоков даже при минимальном объеме исходной информации по напорам подземных вод.

Заключение

Определим отличия и дадим сравнительную оценку двух методик составления карт гидроизогипс: разрабатываемой морфоструктурно-гидрогеодинамической и используемыми в настоящее время, в том числе в компьютерных технологиях (далее коротко – разрабатываемая и принятые методики).

1. Главное различие методик – их модельное содержание, или основа. Разрабатываемая базируется на детерминированной модели обусловленности структуры фильтрационного потока морфоструктурой рельефа, принятые – на вероятностных моделях распределения напоров в точках наблюдения.
2. В разрабатываемой методике положение линейных и площадных элементов структуры фильтрационных потоков, выраженных в напорном поле, задаются неизменными в пространстве и времени моделью морфоструктуры рельефа, в принятых это положение является неопределенным.
3. Отмеченные различия определяют разделение гидрогеодинамических и гидрогеофизических

- задач по определенности их решения на основе карт гидроизогипс. Карты, построенные по разрабатываемой методике, решают прямые задачи, по принятой – только обратные.
4. В разрабатываемой методике каждое новое значение напора водоносного горизонта в скважине по описанным правилам встраивается в модель без нарушения пространственной структуры фильтрационных потоков, расположения источников и стоков (областей питания и разгрузки). В принятых методиках каждая новая скважина изменяет как характеристики поля, так и его структуру, но только в окрестности скважины, не затрагивая остальную площадь карты.
 5. Различны требования к объему исходной информации, удовлетворяющему тем или иным нормативам точности. При построении карты по разрабатываемой методике точность отражения структуры фильтрационного потока и пространственного распределения характеристик его напорного поля определяется конечным и незначительным числом скважин. Для получения такой же точности карт с построением по принятым методикам требуется объем исходной информации в разы больший.
 6. Следующее различие связано с предыдущим и определяется разными принципами при обосновании размещения скважин. Основной принцип обоснования места расположения и числа скважин при использовании первой методики – характерные точки линейных элементов структуры морфологии рельефа, для принятых методик наиболее эффективна равномерная сетка.
 7. И последнее различие. Карты гидроизогипс и гидроизопез, построенные по разрабатываемой методике, достоверно и картографически определены прогнозируют границы областей питания и разгрузки водоносного горизонта. Это определяется детерминированной, по природе взаимодействия – объективной, обусловленностью структурной организации фильтрационных потоков морфоструктурой рельефа. Прогнозные возможности традиционно полученных карт гидроизогипс и гидроизопез имеют вероятностный характер, а уровень вероятности определяется объемом исходной информации по напорам – плотностью и равномерностью точек наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практикум по гидрогеологии / И.К. Гавич, Л.В. Жемерикина, А.М. Крысенко, Д.М. Чумакова. – М.: Недра, 1995. – 253 с.
2. Лукин А.А. Опыт разработки методики морфоструктурно-гидрогеологического анализа. – Новосибирск: Наука, 1987. – 112 с.
3. Огильви Н.А. Физические и геологические поля в гидрогеологии. – М.: Наука, 1974. – 160 с.
4. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / И.К. Гавич, В.С. Ковалевский, Л.С. Язвин и др. – Новосибирск: Наука, 1983. – 240 с.
5. Хмелевской В.К., Костицын В.И. Основы геофизических методов. – Пермь: Перм. ун-т, 2010. – 400 с.
6. Каменский Г.Н., Гавич И.К., Семенова С.М. Гидродинамическая характеристика различных видов потоков подземных вод // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1960. – № 10. – С. 81–88.
7. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – 328 с.
8. Герасимов И.П. Опыт геоморфологической интерпретации общей схемы геологического строения СССР // Проблемы физической географии. Т. 12. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946. – С. 33–46.
9. Мещеряков Ю.А. Структурная геоморфология равнинных стран. – М.: Наука, 1965. – 390 с.
10. Уфимцев Г.Ф., Онухов Ф.С., Тимофеев Д.А. Терминология структурной геоморфологии и неотектоники. – М.: Наука, 1979. – 256 с.
11. Ласточкин А.Н. Морфодинамическая концепция общей геоморфологии. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1991. – 220 с.
12. Морфология рельефа / Г.Ф. Уфимцев, Д.А. Тимофеев, Ю.Г. Симонов и др. – М.: Научный мир, 2004. – 184 с.
13. Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. – Саратов: Изд-во Саратовского гос. ун-та, 1960. – 94 с.
14. Кирюхин В.А. Региональная гидрогеология. – СПб.: Изд-во СПб ГТИ (ТУ), 2005. – 344 с.
15. Карты основных элементов водного баланса и водных ресурсов СССР / науч. ред. И.С. Зекцер, О.В. Попов. – М.: ГУГК, 1982.
16. Коноплянец А.А., Ковалевский В.С., Семенов С.М. Естественный режим подземных вод и его закономерности. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 231 с.
17. Коноплянец А.А., Семенов С.М. Изучение, прогноз и картирование режима подземных вод. – М.: Недра, 1979. – 193 с.
18. Экологическая гидрогеология / А.П. Белоусова, И.К. Гавич, А.Б. Лисенков, Е.В. Попов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 397 с.
19. Лимарева А.А., Лукин А.А. Мониторинг подземных вод хозяйственно питьевого водозабора. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 92 p.
20. Лукин А.А., Лимарева А.А. Крупномасштабное картографирование структуры фильтрационного потока грунтового водоносного горизонта на участке водозабора подземных вод ГРП Секисовское (Республика Казахстан) и обоснование системы мониторинга // Питьевые подземные воды. Изучение, использование и информационные технологии. – Московская область: ВСЕГИНГЕО, 2011. – С. 37–41.
21. Воднобалансовая оценка безопасности подземного захоронения жидких радиоактивных отходов / А.А. Лукин, М.Б. Бука-ты, Ал.Ан. Лукин, Е.В. Шмурыгина, А.А. Зубков, В.В. Данилов // Подземные воды востока России: Матер. Всеросс. совещания по подземным водам востока России. – Тюмень: Тюменский дом печати, 2009. – С. 395–398.

Поступила 30.06.2014 г.

RELIEF MORPHOSTRUCTURE MODELS METHOD OF BUILDING LARGE-SCALE MAP OF HYDROISOHYPSES

Anatoly A. Lukin,
Cand. Sc.

Alexey A. Lukin,
Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lukin@tpu.ru

Anna A. Limoreva,
OILTIM Ecoservice, 3, Televizionny pereulok,
634003, Tomsk, Russia. E-mail: anuta-lim@mail.ru

The main aim of the research is to develop the hydro-morphostructural method of constructing large-scale depth-to-water maps of aquifer. This method allows developing the maps providing the limited background information on groundwater levels in wells. The paper introduces a new approach to map developing based on a deterministic model of controlling pressure field aquifers – the model of relief morphostructure. All existing methods and technologies apply probabilistic models of pressure distribution in mapping hydro-isohyps. The paper introduces: the statement of the research subject and the problem to be solved by the development technique; the adopted content of basic concepts; the brief description of hydrogeological conditions of the object; the points of morphostructural-hydrogeological analysis; the rules for implementing the provisions in the method of constructing large-scale predictive depth-to-water maps; the depth-to-water map generated on the basis of relief morphological structure model for the area of groundwater mining enterprise and evaluation of its accuracy; the comparative evaluations of two methods of mapping – the developed and adopted ones. The main difference of the methods is their modeling content, or foundation. The developed technique is based on a deterministic model of filtration flow structure dependence on relief morphostructure. The adopted technique is based on probabilistic models of pressure distribution at the observation points. In the developed method the position of linear and areal elements of filtration flow structure which are prominent in the pressure field are given permanent in space and time by the model of relief morphostructure. In the adopted ones this position is uncertain. The requirements are different for the scope of the initial information satisfying some standards of accuracy. When constructing the map by the development method the precision in reflecting the filtration flow structure and spatial distribution of characteristics of its pressure field is determined by the finite and small number of wells. The greater amount of initial information is required to obtain the same accuracy of the maps with construction according to the accepted procedures.

Key words:

Ground aquifer, map of hydroisohyps, morphostructure hydrodynamic technique, filtration flow structure, relief morphostructure, flow pattern deformation, orthogonal wave model, direct and inverse hydrogeophysical problems.

REFERENCES

- Gavich I.K., Zhemerikina L.V., Krysenko A.M., Chumakova D.M. *Praktikum po gidrogeologii* [Hydrogeology practicum]. Moscow, Nedra Publ., 1995. 253 p.
- Lukin A.A. *Opyt razrabotki metodiki morfostrukturno-gidrogeologicheskogo analiza* [Experience in developing techniques of morphostructural-hydrogeological analysis]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 112 p.
- Ogilvi N.A. *Fizicheskie i geologicheskie polya v gidrogeologii* [Physical and geological field in hydrogeology]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 160 p.
- Gavich I.K., Kovalevsky V.S., Yazvin L.S. *Osnovy gidrogeologii. Gidroeodinamika* [Basics of hydrogeology. Hydrodynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 240 p.
- Khmelevskoy V.K., Kostitsyn V.I. *Osnovy geofizicheskikh metodov* [Fundamentals of geophysical methods]. Perm, Perm University Press, 2010. 400 p.
- Kamensky G.N., Gavich I.K., Semenova S.M. *Gidrodinamicheskaya kharakteristika razlichnykh vidov potokov podzemnykh vod* [Hydrodynamic characteristics of different types of groundwater flows]. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka*, 1960, no. 10, pp. 81–88.
- Shestakov V.M. *Dinamika podzemnykh vod* [The dynamics of groundwater]. Moscow, MGU Press, 1973. 328 p.
- Gerasimov I.P. *Opyt geomorfologicheskoy interpretatsii obshchey skhemy geologicheskogo stroeniya SSSR* [Experience in geomorphological interpretation of general scheme of the USSR geological structure]. *Problemy fizicheskoy geografii* [Issues of physical geography]. Moscow; Leningrad, USSR AS Press, 1946. Vol. 12, pp. 33–46.
- Meshcheryakov Yu.A. *Strukturnaya geomorfologiya ravninnykh stran* [Structural geomorphology of lowland countries]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 390 p.
- Ufimtsev G.F., Onukhov F.S., Timofeev D.A. *Terminologiya strukturnoy geomorfologii i neotektoniki* [Terminology of structural geomorphology and neotectonics]. Moscow, Nauka publ., 1979. 256 p.
- Lastochkin A.N. *Morfodinamicheskaya kontseptsiya obshchey geomorfologii* [Morphodynamic concept of general geomorphology]. St-Petersburg, Leningrad University Press, 1991. 220 p.
- Ufimtsev G.F., Timofeev D.A., Simonov Yu.G. *Morfologiya relefa* [Relief morphology]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2004. 184 p.
- Filosofov V.P. *Kratkoe rukovodstvo po morfometricheskemu metodu poiskov tektonicheskikh struktur* [Quick Guide in morphometric methods to search for tectonic structures]. Saratov, Saratov State University Press, 1960. 94 p.
- Kiryukhin V.A. *Regionalnaya gidrogeologiya* [Regional hydrogeology]. St-Petersburg, St-Petersburg GGI (TU) Press, 2005. 344 p.
- Karty osnovnykh elementov vodnogo balansa i vodnykh resursov SSSR* [Maps of the main elements of water balance and water resources of the USSR]. Eds. I.S. Zektser, O.V. Popov. Moscow, GUGK Publ., 1982.
- Konoplyantsev A.A., Kovalevsky V.S., Semenov S.M. *Estestvennyy rezhim podzemnykh vod i ego zakonomernosti* [Natural

- groundwater regime and its laws]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1963. 231 p.
17. Konoplyantsev A.A., Semenov S.M. *Izuchenie, prognoz i kartirovanie rezhima podzemnykh vod* [Forecast and mapping of groundwater regime]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 193 p.
 18. Belousova A.P., Gavich I.K., Lisenkov A.B., Popov E.V. *Ekologicheskaya gidrogeologiya* [Environmental Hydrogeology]. Moscow, Akademkniga Publ., 2007. 397 p.
 19. Limareva A.A., Lukin A.A. *Monitoring podzemnykh vod khozyajstvenno pitevogo vodozabora* [Monitoring of groundwater in domestic drinking water intake]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 92 p.
 20. Lukin A.A., Limareva A.A. Krupnomasshtabnoe kartografirovaniye struktury filtratsionnogo potoka gruntovogo vodonosnogo gorizonta na uchastke vodozabora podzemnykh vod GRP Sekisovskoe (Respublika Kazakhstan) i obosnovaniye sistemy monitoring [Large-scale mapping of ground aquifer filtration flow structure at the site of groundwater intake Sekisovskoe (Kazakhstan) and substantiation of the monitoring system]. *Pitevye podzemnye vody. Izuchenie, ispolzovanie i informatsionnye tekhnologii* [Drinking groundwaters. Investigation, use and information techniques]. Moscow region, VSEGINGEO Press, 2011. pp. 37–41.
 21. Lukin A.A., Bukaty M.B., Lukin A.I., Shmurygina E.V., Zubkov A.A., Danilov V.V. Vodobalansovaya otsenka bezopasnosti podzemnogo zakhroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov [The water balance assessment of safety of liquid radioactive waste underground disposal]. *Podzemnye vody vostoka Rossii. Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya po podzemnym vodam vostoka Rossii* [Groundwater of the East of Russia. Proc. of All-Russian meeting on groundwater of the East of Russia]. Tyumen, Tyumensky dom pechati, 2009. pp. 395–398.

Received: 30 June 2014.