

Е.Л. Музылев, Ю.Л. Обьедков

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ

На примере горного водосбора рассмотрены возможности применения спутниковых данных при моделировании процессов формирования поверхностных и подземных вод.

Применение дистанционных методов для исследования, освоения и охраны природных ресурсов существенно облегчает решение гидрологических и гидрогеологических задач, поскольку обеспечивает одновременный охват обширных территорий, оперативность получения информации и возможность многократного обследования представляющих интерес объектов. При исследовании формирования поверхностных вод данные дистанционного зондирования наиболее часто используются для получения сведений о площадных характеристиках подстилающей поверхности (как правило, в их динамике) – размерах различных водных объектов и территорий, покрытых снегом, и районировании водосборов в соответствии с условиями, определяющими их водный режим. Описания гидрологических процессов на водосборе, в частности, процессов формирования стока, обычно получаемые с помощью математических моделей, могут успешно дополняться и уточняться при использовании данных дистанционного зондирования. Так, по оценке, приведенной в [1], точность прогнозов стока в результате введения информации с ИСЗ в традиционные прогностические зависимости возросла на 8 – 10%. Одна из возможностей эффективного применения дистанционных данных при моделировании формирования поверхностных вод состоит в использовании этих данных для калибровки параметров моделей. Хотя ход гидрологических процессов на равнинных и горных водосборах различен, с точки зрения использования спутниковых данных в моделях эти различия не носят принципиального характера.

Рассмотрим на примере горного водосбора возможности применения спутниковых данных при моделировании процессов формирования стока. Модель, разработанная с учетом вертикальной зональности метеозапасов, предназначена для расчета гидрографа стока в замыкающем створе, а также для определения снеготаяния, высотного положения сезонной снеговой границы, степени заснеженности водосбора и поступлений воды на его поверхность [2].

Спутниковые данные о покрытости водосборов снегом использовались для калибровки параметров и верификации модели. Расчет интенсивности таяния h_t производился без учета радиационного эффекта по формуле (1) и с его учетом по формуле (2):

$$h_t = k_1 T; \quad (1)$$

$$h_t = k'_1 T + m R (1 - A), \quad (2)$$

а также с использованием нелинейной зависимости h_t от T , проявляющейся в весенне-летние месяцы и выражающей действие на таяние солнечной радиации

$$h_t = a_1 (T - T_0)^{a_2}. \quad (3)$$

Здесь T и R – средние за расчетный интервал времени значения температуры воздуха и суммарной радиации, поступающей на 1 см² поверхности; k_1 и k'_1 – коэффициенты стаивания; A – альbedo снежного покрова; m – эмпирический коэффициент; T_0 – температура начала снеготаяния; a_1 и a_2 – коэффициенты, найденные по данным многолетних наблюдений за снеготаянием в исследуемом регионе. Выбор формулы для вычисления интенсивности таяния и подбор значений ко-

коэффициентов k_1 , k_1' и m осуществлялись по результатам сравнения степени заснеженности водосборов и высотного положения сезонной снеговой границы на разные даты, определенных по снимкам с ИСЗ и рассчитанных по модели при различных сочетаниях значений коэффициентов приведенных формул. При этом сопоставлении проверялась также правильность выбора значений коэффициентов распределений по высоте водосбора осадков

$$X(H, t) = X(H_0, t) [1 + k_2(H - H_0) + k_3(H - H_0)^2] \quad (4)$$

и температуры воздуха. В формуле (4) $X(H_0, t)$ – осадки на средневзвешенной высоте водосбора H_0 ; k_2 и k_3 – коэффициенты, подбираемые при численных реализациях модели с использованием данных натуральных наблюдений.

Расчеты по модели проводились для бассейнов рек Гавасай и Кассансай (Северный склон Ферганской долины, Чаткальский хребет, Западный Тянь-Шань) с площадью водосборов 657 и 1130 км² соответственно. Выше замыкающих створов (Гава и Кызылтокой) – это типичные среднеазиатские реки снегового питания, часть стока дают также дожди. Объем стока за половодье (80 – 85% годового) определяется зимними запасами снега и выпадающими в период половодья осадками. Половодье начинается в первой половине апреля, заканчивается в августе. Максимальные расходы наблюдаются в мае – начале июня, в июле наступает резкий спад. Среднегодовые расходы воды в створе Гава составляют около 6 м³/с, в створе Кызылтокой – около 8 м³/с, максимальный расход при паводке достигает для р. Гавасай 40 м³/с, для р. Кассансай – 60 м³/с [3].

Оценки степени заснеженности водосбора и высоты сезонной снеговой границы производились по материалам съемки аппаратурой МСУ-С и МСУ-М с ИСЗ <Метеор> и <Космос> в видимом и ближнем ИК-диапазонах при визуальном дешифрировании изображений и с применением ЭВМ. Для обработки использовались снимки 1975 – 1986 гг. за октябрь–июнь с разрешением на местности 1 км и 250 м. Критерием отбора изображений служили отсутствие облачности, небольшие перспективные искажения и высокий угол солнца. Все отобранные снимки были трансформированы оптико-механическим способом и увеличены до масштабов 1:2 500 000 (снимки малого разрешения) и 1:1 000 000 (снимки среднего разрешения). Границы исследуемых бассейнов проводились на снимках по характерным частям рельефа – руслам рек и горным хребтам. Точность определения площади водосбора по снимкам малого разрешения зависит от его размеров и составляет 12% для р. Гавасай и 8% для р. Кассансай. Контрастирование и фильтрация изображений в процессе их обработки на ЭВМ позволили выделить малые изменения яркости, по которым оконтуривание производилось более точно, чем при визуальной обработке снимков.

Покрытость водосборов снегом определялась по контрастам фототона. На снимках малого разрешения в границах исследуемых водосборов выделялись две области – заснеженная и бесснежная. Снимки среднего разрешения позволяли выделить три градации: черный, серый и белый тона, соответствовавшие нулевой, 50 и 100%-й заснеженности. При автоматизированной обработке снимков в интерактивном режиме для каждого водосбора выделялись тестовые участки, соответствовавшие полностью заснеженным и бесснежным областям, по которым автоматически дешифрировались покрытые снегом площади. Данная процедура производилась с помощью алгоритма поэлементной классификации [4]. Дешифрирование снеговой границы осуществлялось также при выборе определенного порога яркости с помощью сегментации спутниковых изображений методом линий уровня [5]. Калибровка значений яркости, соответствовавших снеговой границе, проводилась по данным ежемесячных аэровизуальных наблюдений за снежным покровом исследуемых бассейнов. Изменению уровня яркости на 10 единиц (весь диапазон изменения яркости от черного к белому составлял 128 единиц) соответствовало изменение высоты положения снеговой границы на 100 м. Различие значений высот снеговой границы, определенных методами поэлементной классификации и линий уровня, может достигать 250 м, причем результаты, полученные первым методом, близки к результатам визуального определения положения снеговой линии. Точность определения заснеженных площадей составила в зависимости от разрешающей способности аппаратуры различных ИСЗ при визуальном дешифрировании 6 – 10% [2], а при обработке на ЭВМ – 3 – 4%. Различия в оценке степени заснеженности, вызванные расхождением в проведении контуров при визуальном и автоматизированном дешифрировании, особенно ярко выявились при анализе снимков за февраль в разные годы (рис. 1 а, б, в).

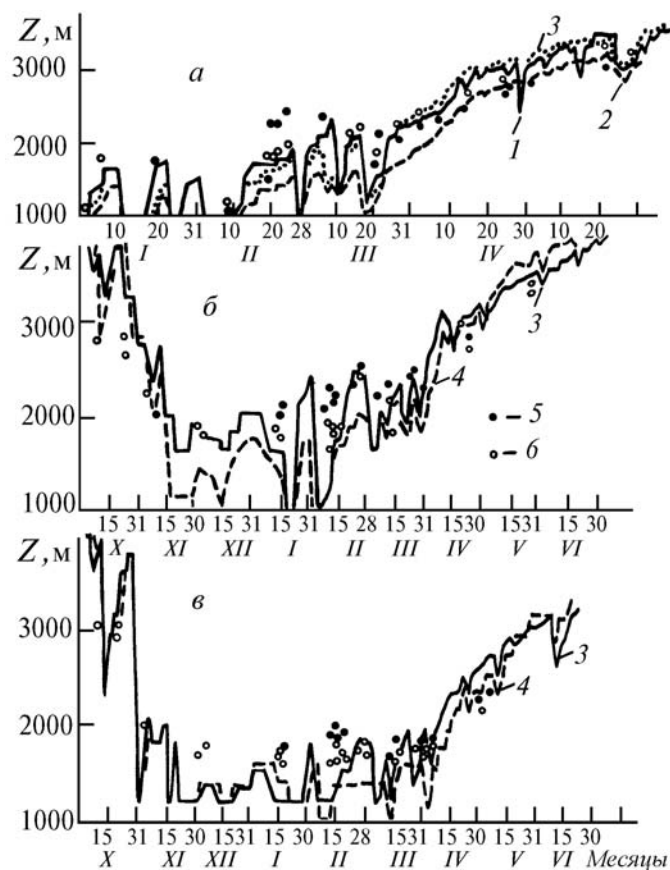


Рис. 1. Высотное положение снеговой линии для бассейнов р. Гавасай, 1978г. (а) и 1983г. (б); р. Кассансай, 1983 г. (в). Результаты расчетов по модели для шестичасовых (1) и суточных (2 – 4) интервалов и результаты анализа спутниковых данных: 1 и 3 – при использовании формулы (1), $K_1 = 5$ мм/(град-сут); 2 – при использовании формулы (2), $K_1' = 1,8$ мм/(град-сут), $m = 0,011$; 4 – при использовании формулы (3); 5 – при визуальном дешифрировании; 6 – при обработке на ЭВМ

В результате обработки с помощью ЭВМ изображений в двух спектральных диапазонах – 0,5 – 0,6 и 0,8 – 1,1 мкм выявилось уменьшение значений степени заснеженности в ближнем ИК-диапазоне в среднем на 3%. Эта величина не превышает погрешности определения степени заснеженности, что не позволяет сделать вывод о возможности оценки площади одновременного стаивания по результатам сравнения снимков разных диапазонов.

При выборе формулы для интенсивности таяния и подборе величин коэффициентов стаивания значения степени заснеженности водосбора, определенные по спутниковым данным, использовались в расчетах снегозапасов и интенсивности поступлений воды на поверхность водосбора. В целях калибровки модели вычисленные значения снегозапасов сравнивались за разные годы для бассейна р. Гавасай с измеренными при наземных снегомерных съемках в конце января, февраля и марта, с данными гамма-съемки в те же сроки и с данными наблюдений за высотой снежного покрова по авиадистанционным рейкам (значения плотности снега брались по наблюдениям метеостанций, находящихся в бассейне), а для бассейна р. Кассансай – с результатами наблюдений по авиадистанционным рейкам. Упомянутое выше сопоставление значений высот снеговой границы, полученных по модели и по спутниковым данным, представлено на рис. 1, а, б, в для 1978 и 1983 гг. для бассейна р. Гавасай и для 1983 г. для р. Кассансай. Аналогичное сопоставление проведено для обоих водосборов для всех расчетных лет.

Наилучшие совпадения оказались при коэффициенте стаивания 5 мм/(град-сут), хотя в ряде случаев получились расхождения в положении снеговой границы и степени заснеженности. Основной причиной несовпадения следует считать неучет в модели внутрисуточного хода температур, особенно в периоды перехода температуры через 0° . Расчеты с 6-часовым ша-

гом по времени подтвердили правильность этого предположения – расхождения в результатах оценки по модели и по данным ИСЗ уменьшились до 150 – 200 м (рис. 1, а, б, в), что лежит в пределах ошибки определения снеговой границы по спутниковым данным. Несовпадения результатов расчетов по модели с данными ИСЗ может также проявляться: из-за чрезмерной реакции модели на незначительные осадки при одновременном понижении температуры до отрицательных значений, что описывается как резкое увеличение заснеженности и не отвечает действительному ходу процессов снеготаяния; из-за неучета неравномерности залегания снежного покрова, в том числе на склонах разных экспозиций и на дне долин; из-за неточности привязки спутниковых изображений к данному водосбору и погрешностей трансформации снимков; из-за недостаточной разрешающей способности сканирующей аппаратуры и по ряду других причин.

Сравнение результатов расчетов высоты снеговой границы и степени заснеженности при линейной и квадратичной экстраполяции осадков по высоте показало, что для изучаемых бассейнов может использоваться линейное приближение.

Полученные значения поступлений на водосбор талой воды трансформировались с помощью модели в гидрографы стока в замыкающих створах. Соответствие вычисленных гидрографов фактическим для всех расчетных лет (1975 – 1986) оценивалось визуально по графикам и с помощью критерия качества. На рис. 2, а, б, в, г представлены рассчитанные и фактические гидрографы стока обеих рассматриваемых рек за разные годы. Наилучшие совпадения получаются для лет малой и средней водности по стоку.

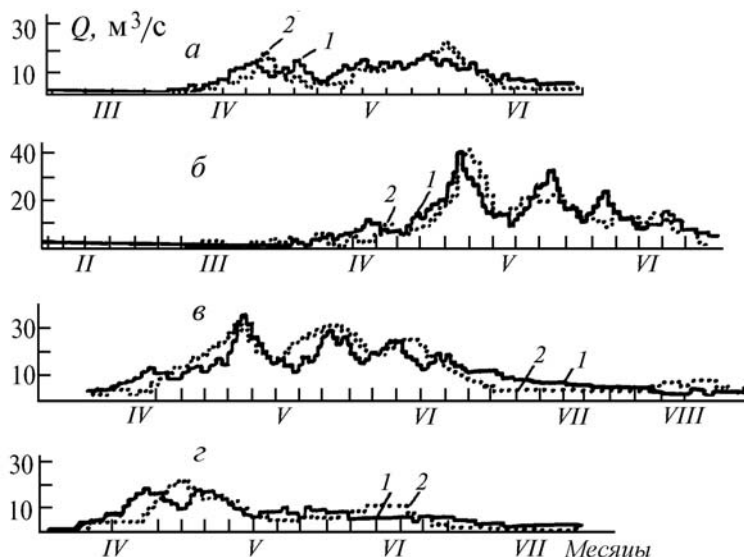


Рис. 2. Фактические (1) и рассчитанные при $K_1=5$ мм/(град·сут) (2) гидрографы стока р. Гавасай: г/п Гава 1975 г. (а); 1980 г. (б) и р. Кассансай: г/п Кызылтокой, 1980 г. (в); 1982 г. (г)

Аналогичный подход к использованию дистанционных данных реализуется и при расчетах стока половодья равнинных рек. Для оценок же влагозапасов почвы и потерь на суммарное испарение и фильтрацию, определяющих приток воды к русловой сети и водоемам, используют модель влагопереноса в системе <почва – растительность – атмосфера> при осреднении всех составляющих водного баланса по типам почв и видам растительности и затем стыкуют эту модель с моделью формирования стока. Упомянутое осреднение гидрологических характеристик производят с использованием данных дистанционного зондирования. В настоящее время такой подход успешно развивается в Институте водных проблем РАН.

Для установления региональных закономерностей условий формирования подземных вод, выяснения характера и степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод, осуществления их охраны и определения степени экологического изменения среды и ее подземной составляющей от длительного и интенсивного антропогенного воздействия в Институте водных проблем РАН разработаны научно-методические основы дешифрирования аэрокосмической информации. Методика отработана на различных полигонах Европейской части России, а также в процессе космических экспериментов международных экипажей на территориях Монголии, Сирии и Афганистана.

Из всего комплекса данных, содержащихся на космических снимках, выделяется та полезная часть о физиономических компонентах ландшафта (рельефе, гидрографии, растительности, тектонике и т.д., т.е. выполняется анализ рисунка фотоизображения), которая связана с гидрогеологическими условиями изучаемой территории. Сущность методики гидрогеологического дешифрирования сводится к изучению информативности различных диапазонов космической съемки, выявлению и выделению прямых, косвенных и комплексных признаков, которые встречаются не случайно, а образуют закономерные сочетания в различных природно-территориальных комплексах, а затем последовательному выявлению и накоплению сведений о гидрогеологических явлениях и процессах. При этом обработка космической информации разделяется на три этапа: аналитическое дешифрирование компонентов ландшафта; разработку синтетических индикационных схем и составление специализированных и общих гидрогеологических карт [6–8].

На основе выделенных дешифровочных признаков и установлении их индикационной роли первоначально составляется серия аналитических карт и схем, отражающих некоторые аспекты общих геолого-гидрогеологических особенностей территории. К этим картам прежде всего следует отнести карты водопунктов и водопроявлений, густоты речной сети и эрозионной расчлененности рельефа, растительного покрова, литолого-фациальные, тектонические (линеаментов и кольцевых структур), геоморфологических элементов ландшафта и др.

Анализ плана гидрографической сети дает представление о составе пород, трещиноватости, позволяет выявить зоны глубинных разломов, элементы складчатых структур, связь долин с неотектоническими поднятиями. Изучение типов форм рельефа позволяет выявить области питания, стока и разгрузки подземных вод, оценить взаимосвязь поверхностных и подземных вод, определить геолого-генетические комплексы пород, их мощность, особенности литологического состава, трещиноватости пород.

Изучение толщ горных пород по материалам космической съемки представляет интерес не столько для выяснения состава горных пород, сколько для оценки пространственного распределения их фильтрационных свойств. Это позволяет для различных региональных гидрогеологических построений не только упростить стратиграфическую основу в геологически сложных районах, но и, учитывая генезис водовмещающих пород, по морфоструктурным признакам выделить геофильтрационные среды того или иного типа и определить характер залегания и границы их распространения. А это дает возможность выполнить количественную оценку проницаемости и емкости пород для предварительного суждения о подземном стоке и запасах подземных вод.

Дешифрирование тектонических элементов, к которым относятся линеаменты и кольцевые структуры, играет важную роль в установлении закономерностей и условий формирования, движения и разгрузки подземных вод изучаемых территорий. Выявление гидрогеологической роли разрывных нарушений позволяет также оценить гидродинамическую обстановку региона, установить соподчиненность гидрогеологических таксонов и их границы.

Растительный покров также несет важную гидрогеологическую нагрузку, т. к. позволяет установить состав поверхностных отложений, глубину залегания уровня грунтовых вод, характер их минерализации, процессы влагопереноса в зоне аэрации и интенсивность развития экзогенных процессов (заболачивание, засоление и др.).

На следующем этапе в результате анализа и обобщения аналитических карт составляются синтетические ландшафтно-типологические и ландшафтно-индикационные схемы. Они создаются на основе геолого-геоморфологического принципа, т.е. выделяются морфоструктурные единицы, обусловленные геолого-тектоническими условиями территории, и изучаются их взаимоотношения и генетические связи. Установленные логические связи между выделенными таксономическими подразделениями и условиями распространения подземных вод позволяют судить о гидрогеологической обстановке изучаемой территории.

Эти карты составляются на основе синтеза трех источников – дешифрирования ландшафта на космоснимках, анализа взаимосвязи результатов аналитического дешифрирования (гидрографической сети, геоморфологического, геоботанического) и анализа материалов и результатов полевых наземных работ. На них выносятся дешифровочные признаки, характеризующие средние и мелкие элементы рельефа, наличие характерного растительного покрова и его густоту, литолого-фациальную характеристику покровных отложений, выходы коренных пород, водопроявления и их приуроченность, направление тектонических нарушений и степень трещиноватости пород, проявление на поверхности различных природных процессов и явлений (карст, оползни, осыпи, солончаки, такеры, наледи, заболоченность и др.).

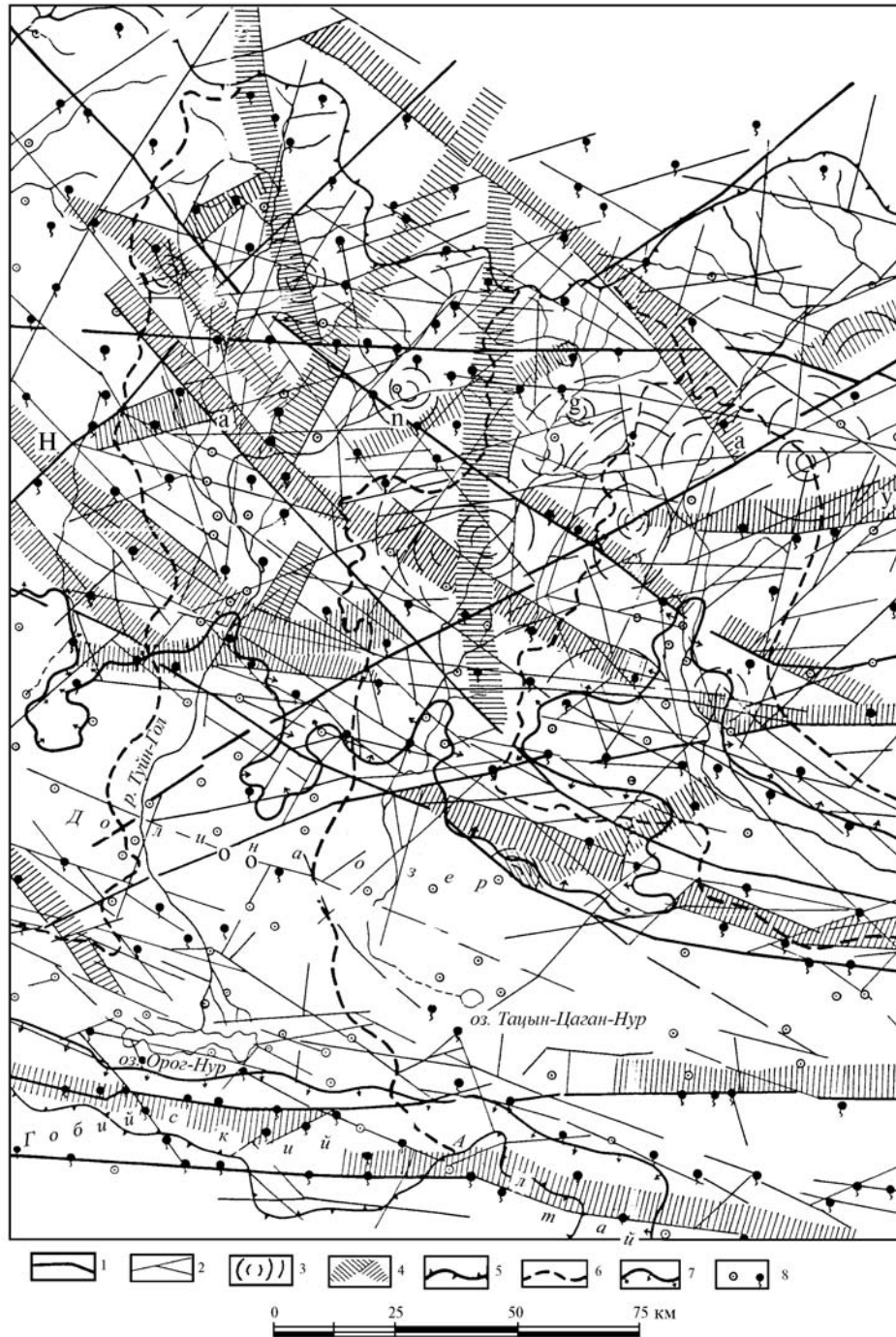


Рис. 3. Структурно-гидрогеологическая схема центральной части Долиноозерского артезианского бассейна МНР (по данным дешифрирования синтезированного космоснимка, ПКК <Салют-6>, 24.VII. 82): 1 – разрывные нарушения; 1 – региональные глубинные разломы; 2 – прочие разломы; 3 – кольцевые структуры; 4 – зоны трещиноватости; 5 – 7 – границы: 5 – Долиноозерского артезианского бассейна; 6 – водосборных речных бассейнов; 7 – региональных областей питания; 8 – водопроявления (скважины, родники)

Помимо ландшафтно-индикационных на этом этапе составляются структурно-тектонические схемы. Содержание последних определяет информацию о геологической структуре территории, которая может быть использована при характеристике гидрогеологических условий (уточнении границ гидрогеологических таксономических единиц, определении направления потоков подземных вод, часто локализующихся в зонах повышенной трещинова-

тости и на крыльях и сводах геологических структур, выявлении гидрогеологической роли разрывных нарушений, оказывающих значительное влияние на формирование, движение и разгрузку подземных вод, взаимосвязь напорных и грунтовых вод и т.д.) (рис. 3).

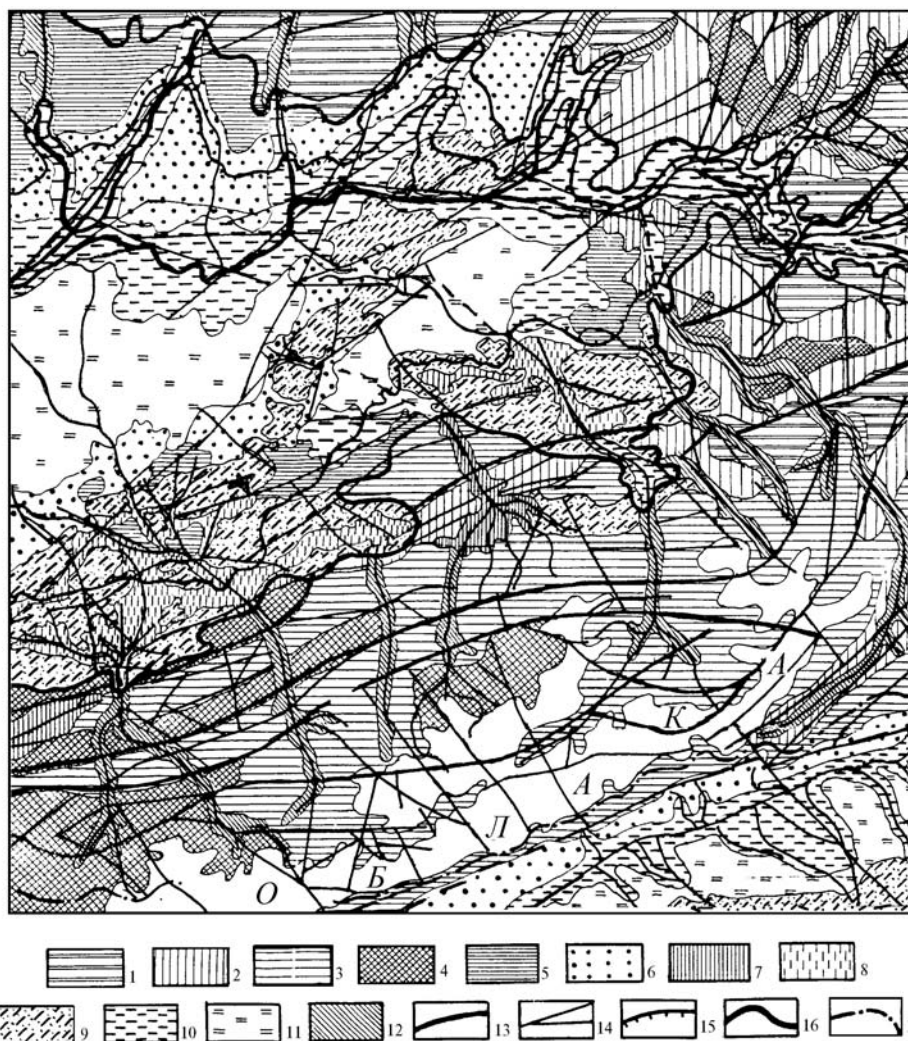


Рис. 4. Гидрогеодинамическая схема условий формирования подземных вод восточной части Ферганского артезианского бассейна (результаты дешифрирования космоснимка с ИСЗ <ERTS-1> 4.VI.1973 г.).

Региональные области питания подземных вод. 1 – 4 – районы, где питание подземных вод осуществляется: 1 – в пластово-поровые палеогенчетвертичные отложения за счет инфильтрации атмосферных осадков; 2 – в мезозойские трещиновато-поровые породы за счет инфильтрации и притока из смежных водоносных комплексов; 3 – в верхне- и среднепалеозойские трещиноватые карстовые породы за счет инфильтрации; 4 – в метаморфические и изверженные трещинные породы нижнего и среднего палеозоя за счет инфильтрации атмосферных осадков.

Местные области питания подземных вод: 5 – районы местного питания пластово-поровых вод средне-нижнечетвертичных отложений; 6 – районы местного питания, переходящие в зоны частичной разгрузки поровых вод конусов выноса.

Области стока и разгрузка подземных вод: 7 – 8 – районы преимущественного распространения пластово-поровых подземных вод неоген-четвертичных отложений внутригорных (7) и задырных (8) впадин, в которые происходит частичная разгрузка трещинно-жильных и трещинно-карстовых вод палеозойских образований; 9 – районы преимущественного распространения напорных вод в мезозойских отложениях, перекрытых маломощным чехлом четвертичных образований; в верхних частях наблюдается местное питание и частичная разгрузка по долинам рек трещинно-поровых вод неоген-четвертичных образований; 10 – районы стока и частичной разгрузки перетеканием напорных подземных вод в пластово-поровых мезозой-четвертичных отложениях; 11 – районы преимущественной разгрузки напорных подземных вод в пластово-поровых мезозой-четвертичных отложениях; 12 – районы местной разгрузки пластово-трещинных и трещинно-жильных вод отложений мезозоя и палеозоя; 13 – 14 – разрывные нарушения: 13 – региональные, глубинные; 14 – прочие; 15 – 17 – границы: 15 – распространения напорных вод; 16 – региональных областей питания; 17 – артезианского бассейна

Рассмотренные выше синтетические ландшафтные и структурные схемы, отражающие связь физиономических компонентов с геолого-гидрогеологическими условиями, позволяют перейти на завершающем этапе к составлению общих и специальных гидрогеологических карт. Нагрузка гидрогеологических карт зависит от степени детальности изучения природно-территориальных комплексов с помощью дистанционных методов и может включать в себя гидрогеологическое районирование, площади распространения и характеристику водоносных горизонтов и комплексов, некоторые количественные показатели коллекторских и водопроявляющих свойств водовмещающих пород, относительную характеристику величины подземного стока [9] (рис. 4).

Специальные гидрогеологические карты отражают некоторые аспекты гидрогеологических особенностей изучаемой территории и включают карты водопунктов и водопроявлений, глубин залегания и минерализации подземных вод на различные периоды времени, дренированности территории, влияние тектонической и неотектонической обстановки на гидрогеологические условия и другие.

Детальный анализ космоснимков позволяет уточнить взаиморасположение и границы распространения артезианских бассейнов и гидрогеологических массивов различного порядка, некоторые суждения о естественных ресурсах и геологических запасах подземных вод, особенно в труднодоступных и малоизученных районах.

Описанные способы использования дистанционной информации при изучении поверхностных и подземных вод могут рассматриваться в качестве начального этапа создания системы мониторинга природных вод суши. Однако разработка системы мониторинга в его классическом понимании требует огромных затрат средств, времени и материальных ресурсов, что при современной обеспеченности гидрологической и гидрогеологической науки не представляется возможным. Поэтому использование разновременной космической информации остается на данный момент практически единственным способом изучения закономерностей и условий формирования природных вод.

1. Castruccio P.A., Loats H.H., Lloyd D., Newman A.B. Cost/benefit analysis for the operational applications of satellite snowcover observations. // Operational applications of satellite snowcover observations. Proc. workshop at Sparks, Nevada, 1979. NASA Conf. Publ. N 2116, 1980. P.239 – 254.
2. Музылев Е. Л. Моделирование стока горных рек и спутниковая информация. М.: Наука, 1987. 136 с.
3. Ильин И. А. Водные ресурсы Ферганской долины. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 248 с.
4. Чижевский А. М. // Исследование Земли из космоса. 1982. N 6. С. 104 – 107.
5. Минский Д.Е., Фейгин М.М. // Исследование Земли из космоса. 1985. N 1. С. 103–112.
6. Обьедков Ю. Л. Формирование естественных ресурсов подземных вод аридных районов. М.: Наука, 1986. 250 с.
7. Обьедков Ю. Л. Использование материалов космической съемки для составления средне- и мелкомасштабных гидрогеологических карт. М. :ЦНИИГАиК, 1992. С.70 – 80.
8. Садов А.В., Ревзон А.Л. Аэрокосмические методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М. :Недра, 1979. 224 с.
9. Джамалов Р. Г., Зекецер И. С., Обьедков Ю. Л. // Разведка и охрана недр. 1977. N 1. С. 45 – 52.

Институт водных проблем РАН,
Москва

Поступила в редакцию
21 декабря 1992 г.

E.L. Muzylev, Ju.L. Ob'edkov. Investigation of Surface and Underground Water Forming by means of Remote Methods.

Potentials of use the satellite data when modelling the processes of surface and underground water forming are illustrated by the example of mountainous water sump.