

А. Л. Брикс, Р. Б. Гаврилюк

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАСТВОРЕННЫХ В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА УЧАСТКЕ АЭРОДРОМА г. НИКОЛАЕВ (УКРАИНА)

Наведені результати багаторічних спостережень за зміною рівнів ґрунтових вод та вмісту розчинених у воді вуглеводнів поблизу складу авіаційного палива. Аналіз цих даних дозволив виявити змінний, місцями коливальний характер процесу розповсюдження нафтопродуктового забруднення у ґрунтових водах.

The results of long-term observations of changes in groundwater levels and the content of dissolved hydrocarbons near a warehouse of aviation fuel are presented. Analysis of these data revealed a variable, sometimes oscillatory nature of the distribution of petroleum products pollution close to the surface groundwater.

Характеристика гидрогеологических условий территории, загрязненной нефтепродуктами

Натурные исследования процессов распространения растворенных нефтяных углеводородов (УВ) проведены в пределах аэродрома около г. Николаев (рис. 1). Исследуемый участок расположен в районе склада горюче-смазочных материалов (ГСМ) – основного источника загрязнения геологической среды (ГС) нефтепродуктами (НП). Наиболее значимым объектом зоны загрязнения обычно принято считать так называемую "линзу", представляющую собой совокупность подвижных легких нефтепродуктов (ЛНП), которые поступают в ГС в результате систематических утечек и случайных разливов на поверхности земли и скапливаются на уровне грунтовых вод (УГВ) в виде локальной зоны полного насыщения. "История" обнаружения этой линзы на рассматриваемой территории изложена в работе [1], посвященной постановке и проведению мониторинговых исследований. Точно известно место образования линзы – это площадка склада ГСМ. О времени начала формирования линзы можно лишь догадываться, ориентируясь на начало эксплуатации аэродрома (начало 50-х годов XX ст.). Ее площадь, по данным современного картирования, превышает 75 тыс. м², средняя мощность слоя ЛНП составляет примерно 2 м. К моменту обнаружения линза переместилась за пределы склада на восток, т. е. в преобладающем направлении движения грунтовых вод.

На начальном этапе исследований считали, что линза является основным источником загрязнения грунтовых вод растворенными УВ. С целью изучения динамики загрязнения была заложена сеть мониторинговых скважин, охватывающая как участок расположения линзы, так и прилегающую территорию загрязнения грунтовых вод НП. Мониторинг УГВ и слоя ЛНП с отбором проб воды для определения содержания нефтяных УВ проводился с октября 2002 г. на протяжении 3,5 лет, с периодичностью как минимум один раз в четыре месяца. Отбор проб грунта осуществлялся в процессе бурения скважин.

Гидрогеологические условия первого от поверхности водоносного горизонта, приуроченного к слоистой толще четвертичных суглинков в пределах ареала загрязнения, довольно изменчивые и требуют дифференцированного описания. С этой целью были выделены три участка.

Первый участок – это площадка склада ГСМ. Здесь отмечают наиболее высокие в пределах исследуемой территории аэродрома отметки поверхности земли и, конечно, УГВ. Отсюда загрязненные воды и ЛНП в виде свободной несмешивающейся с водой жидкости могут распространяться в диапазоне направлений от восточного до юго-западного. Можно предположить, что на формирование ареала загрязнения на этом участке влияли не только утечки из собственных резервуаров хранения топлива и проливы при выполнении разгрузочно-погрузочных операций, но и приток загрязненных грунтовых вод с запада и северо-запада, т. е. со стороны железнодорожной станции, непосредственно соседствующей с аэродромом.

© А. Л. Брикс, Р. Б. Гаврилюк, 2011

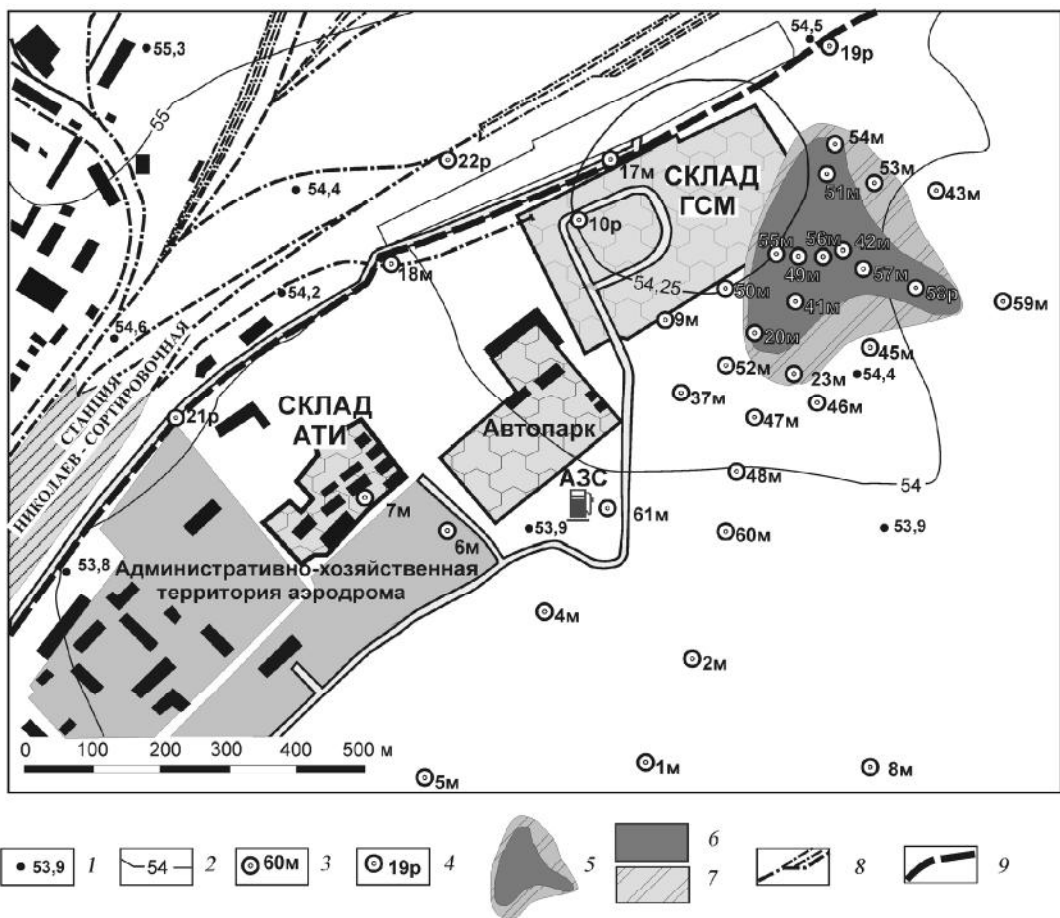


Рис. 1. Обзорная схема района исследований

1 – отметки поверхности земли; 2 – изогипсы поверхности земли; скважины: 3 – мониторинговая, 4 – разведочная; 5 – линза ЛНП на поверхности грунтовых вод; толщина слоя ЛНП: 6 – более 2 м, 7 – менее 2 м; 8 – железнодорожные линии; 9 – северо-западная граница аэродрома

К сожалению, статус особо охраняемого объекта явился препятствием для детального исследования площадки склада. Здесь удалось пробурить лишь одну разведочную скважину (скв. 10р). Эта скважина оказалась как раз на месте, где в прошлом происходила инфильтрация НП – хотя линза ЛНП не была обнаружена, но вся вскрытая грунтовая толща от поверхности земли до глубин интервала колебания УГВ содержала захваченный НП. Однако полученные данные нельзя безоговорочно распространять на всю территорию склада. Площадка довольно большая (свыше 75 тыс. м²); на ней расположены резервуары с различным режимом эксплуатации, так что и очагов (источников) загрязнения, по-видимому,

было несколько. От месторасположения первичных очагов загрязнения может зависеть "история" формирования мобильных скоплений ЛНП в ГС. Так, в отношении линзы, выявленной к востоку от склада, можно с большой степенью уверенности утверждать, что ее нынешнее "тело" – результат слияния нескольких линз, которые могли образоваться десятки лет назад в центральной, северной и, конечно, восточной частях площадки склада. Если источник поступления НП на УГВ находился в западной части площадки, то миграция нефтепродуктового загрязнителя в растворенном или свободном виде могла происходить в южном или юго-западном направлении. А происходила ли миграция жидкого ЛНП в этом направлении

в действительности? В пользу этой версии свидетельствует обнаруженное в двух скважинах (скв. 6м и 7м) загрязнение грунтовой толщи в интервале колебания УГВ. Однако почему в таком случае "чистыми" оказались разрезы других скважин, расположенных к югу от склада ГСМ? Возможно, источник загрязнения следовало искать в другом месте? Скв. 7м, например, находится рядом со складом авиационно-технического имущества (АТИ), а скв. 6м расположена менее чем в 100 м от автопарка. Оба объекта вполне подходят на роль если не главного, то дополнительных источников загрязнения.

На втором участке, расположенном к востоку от склада ГСМ, наблюдается резкое погружение поверхности грунтового водоносного горизонта. УГВ снижаются от глубины 4,5 м на границе площадки склада (скв. 50м) до 10 м на расстоянии 400 м от склада в направлении потока (скв. 59м). Максимальное значение уклона урвенной поверхности 0,024 отмечается именно там, где в настоящее время расположена линза ЛНП. В начале исследований предполагали, что линза с момента образования и до настоящего времени находится в состоянии движения при средней скорости перемещения фронтальной части 12–15 м/год. При более детальной обработке результатов наблюдения за УГВ на пути движения линзы было выявлено воронкообразное понижение урвенной поверхности, образование которого в ненарушенных условиях* можно объяснить только интенсивным нисходящим перетеканием грунтовых вод через так называемое "гидрогеологическое окно" [1].

Таким образом, фронтальная часть движущейся линзы в какой-то момент должна была бы неизбежно наткнуться на вышеупомянутую "воронку" и остановиться. В то же время течению свободного ЛНП из верховой части линзы ничто не препятствует, и в результате в нижней части происходит его накопление. При бурении скв. 58р зафиксирована максимальная толщина слоя ЛНП – 4,3 м.

Поскольку ЛНП имеет плотность меньше плотности воды, он не участвует в нисходящей фильтрации через "гидрогеологичес-

кое окно". Угрозу загрязнения нижележащего водоносного горизонта представляет перенос растворенных в воде УВ. Версия нисходящего переноса растворенного загрязнителя подтверждается наличием УВ в образцах грунта, отобранных с глубин, превышающих глубину подошвы линзы ЛНП.

Третий участок аэродрома, расположенный к юго-западу от склада ГСМ, характеризуется совершенно иными условиями. Дневную поверхность здесь можно считать плоской, хотя в центре участка едва заметно понижение, которое можно было бы принять за результат случайной ошибки топосъемки. Однако на карте гидроизогипс, построенной по данным замера УГВ 25.10.2003 г., именно в этом месте проявилась своеобразно вытянутая форма, характерная для погребенной долины прареки (балки). Такое совпадение вряд ли можно считать случайным. Также не случайными представляются минимальные глубины залегания грунтовых вод (1–2,5 м) и максимальные амплитуды колебания УГВ (2–3 м).

В результате решения обратной задачи на математической модели территории исследований [1] было подтверждено предположение о наличии локальных участков *интенсивного нисходящего перетекания* (ИНП) грунтовых вод в нижележащий водоносный горизонт*. Эти "гидрогеологические окна", вероятно, приурочены к участкам утончения слоя красно-бурых глин или "облегчения" их гранулометрического состава.

Наглядное представление о закономерностях изменения УГВ во времени дает анализ графиков, приведенных на рис. 2. Из всей совокупности графиков можно выделить две визуально отличающиеся группы. В верхней части рисунка расположены графики, демонстрирующие ярко выраженную зависимость глубин залегания УГВ от сезонных изменений внешних условий, определяющих величину инфильтрационного питания/испарения. Скважины, по данным которых построены эти графики, находятся в пределах первого и третьего участков. Максимальный подъем УГВ и соответственно минимальные глубины их залегания приу-

* В феврале 2004 г. началась опытно-эксплуатационная откачка в нижней части линзы ЛНП. До этого времени на территории аэродрома откачки грунтовых вод не проводились.

* По данным моделирования, максимальная интенсивность перетекания на участке ИНП составляет $2 \cdot 10^{-3}$ м/сут при среднем для всей территории значении $3 \cdot 10^{-6}$ м/сут.

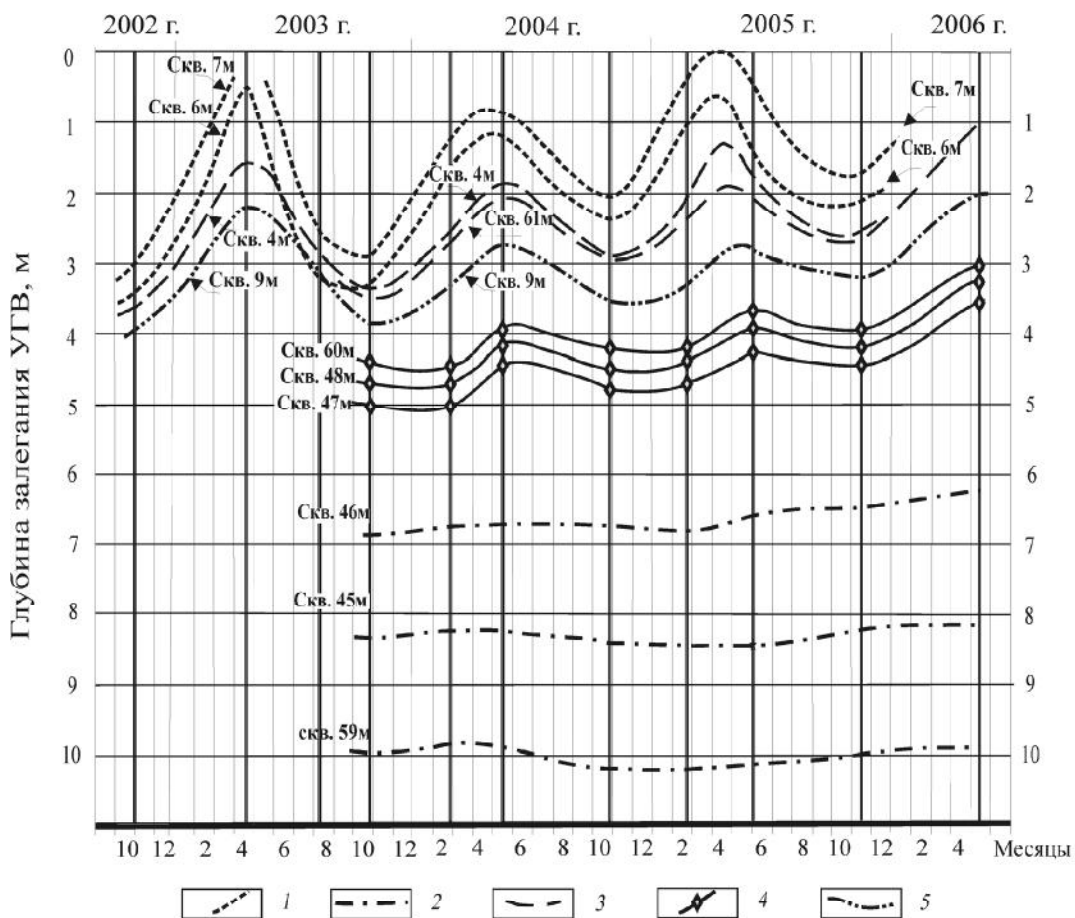


Рис. 2. Изменение во времени глубин залегания уровней воды в скважинах
 Скважины: 1 – 6 м и 7 м; 2 – 46 м, 45 м и 59 м; 3 – 4 м и 61 м; 4 – 47 м, 48 м и 60 м; 5 – 9 м

рочены к периоду, непосредственно следующему за весенним снеготаянием (апрель–май). Максимальные глубины залегания УГВ отмечаются в период осенней межени (октябрь–ноябрь). Максимальные значения амплитуды колебания уровня воды (2–3 м) зафиксированы в скв. 6 м и 7 м, расположенных в центре третьего участка. Судя по графику, в весенний период в районе скв. 7 м отмечается подъем УГВ до поверхности земли, что подтверждает сведения о периодическом подтоплении административно-хозяйственной части аэродрома. Аналогичный уровень режим в северо-западной части аэродрома (скв. 18 м и 17 м), где значения УГВ колеблются в том же интервале глубин.

Графики в нижней части рис. 2 отображают уровень режим грунтовых вод в пре-

делах второго участка. Амплитуда колебания УГВ на этом участке изменяется от 0,6 (скв. 46 м) до 0,3 м (скв. 59 м). Характер колебания УГВ в связи с их значительной глубиной залегания (свыше 6 м) определяется не влиянием сезонных факторов, а интегральными условиями питания грунтовых вод, причем не текущего, а предыдущих годов.

Прочие графики занимают промежуточное положение. Они довольно четко отражают сезонный характер колебания УГВ в отличие от графиков нижней части рис. 2. А от верхних графиков они отличаются не только меньшей амплитудой, но и большей синхронностью, поскольку при глубине залегания УГВ более 3 м, как известно [2, 5], осложняющее влияние на влагоперенос приповерхностных факторов существенно ослабевает.

В результате проведенных наблюдений установлено, что из-за неравномерных колебаний УГВ на соседних участках как минимум два раза в год существенно изменяется схема грунтового потока. С целью исследования влияния таких изменений грунтового потока на условия распространения нефтепродуктового загрязнения выполнено математическое моделирование нестационарной фильтрации в толще лессовидных суглинков с помощью программной системы GWFS ("Геолинк Колсантинг", г. Москва, РФ).

Оценка условий распространения нефтепродуктового загрязнения

По результатам моделирования нестационарной фильтрации построены карты гидроизогипис, достоверность которых подтверждается удовлетворительным совпадением модельных и натуральных данных в контрольных точках*. Ортогонально к гидроизогиписам проведены линии тока, указывающие на направление фильтрации, а следовательно, и переноса растворенных в воде УВ. Область распространения растворенных в грунтовых водах УВ для удобства интерпретации результатов исследований разделена на четыре зоны (рис. 3).

В зоне 1, ограниченной линиями тока, которые охватывают участок склада ГСМ и линзу мобильных ЛНП, в течение всего периода наблюдений фиксировались максимальные концентрации УВ. В пробах воды из скв. 17м, 9м, 50м и 52м, расположенных вблизи площадки склада ГСМ, содержание УВ колеблется в пределах 12–24 мг/дм³ (рис. 3, А). Можно было бы ожидать закономерное увеличение концентраций УВ в весенний период в связи с подъемом УГВ и переходом части НП, удерживаемых грунтами зоны аэрации, в раствор. Однако выявить влияние сезонного фактора в этих изменениях не удалось. Только однажды в отобранных 15 мая 2004 г. после "рекордных" по своей интенсивности дождей пробах воды было зафиксировано многократное увеличение содержания загрязнителя, превышающее растворимость авиационного керосина

* В качестве контрольных (эталонных [3]) точек используются центры тех модельных блоков, для которых по данным натурных наблюдений могут быть определены достоверные значения оцениваемых величин.

(рис. 3, Б). Можно предположить, что содержание УВ в воде при концентрации выше предела растворимости обуславливается процессами самопроизвольного диспергирования, в которых эмульгатором выступают мицеллообразующие поверхностно-активные вещества (ПАВ). Поступление ПАВ в грунтовые воды происходит в результате инфильтрации атмосферных осадков через почвенный слой [4]. В настоящей работе это явление упоминается как интересный научный феномен, практическое значение которого, по-видимому, несущественно, поскольку уже через полгода в тех же точках отбора проб воды, где был зафиксирован "рекорд", содержание УВ снизилось до прежнего уровня. А в скважинах, расположенных ниже по потоку, признаки* наличия нефтяной эмульсии не отмечались ни разу за весь период наблюдений.

В скв. 37м, 47м и 45м, которые находятся вблизи линии тока 1/2, ограничивающей с юга указанную зону, содержание УВ на два порядка меньше (0,3–0,6 мг/дм³). С последующим удалением на юг от зоны 1, в целом отличающейся максимальным загрязнением, можно было бы ожидать уменьшение концентрации растворенных УВ. Однако на самом деле в пробах воды из скв. 61м и 48м (зона 2) выявлено резкое увеличение концентраций до 12,5–23,6 мг/дм³. Объяснить этот несколько неожиданный факт можно наличием выше по течению от упомянутых скважин двух объектов – АЗС и автопарка, которые даже априори следовало бы считать источниками поступления НП в ГС.

Зона 3 в своей верховой части соседствует со складом ГСМ, но нефтяное загрязнение грунтовых вод, судя по гидродинамической схеме, представленной на рис. 3, формируется за пределами аэродрома. Линия тока 3/4, разделяющая зоны 3 и 4, расположена вдоль вытянутого с севера на юг участка ИНП грунтовых вод, что обеспечивает ей стабильность пространственного положения. Сезонные изменения гидродинамических условий на этом участке весьма заметно отражаются на расходах бокового потока. В период осенней межени приток к участку ИНП со стороны зон 4 и 3

* Под признаком наличия эмульсии здесь подразумевается фактическое содержание в воде УВ выше их растворимости.

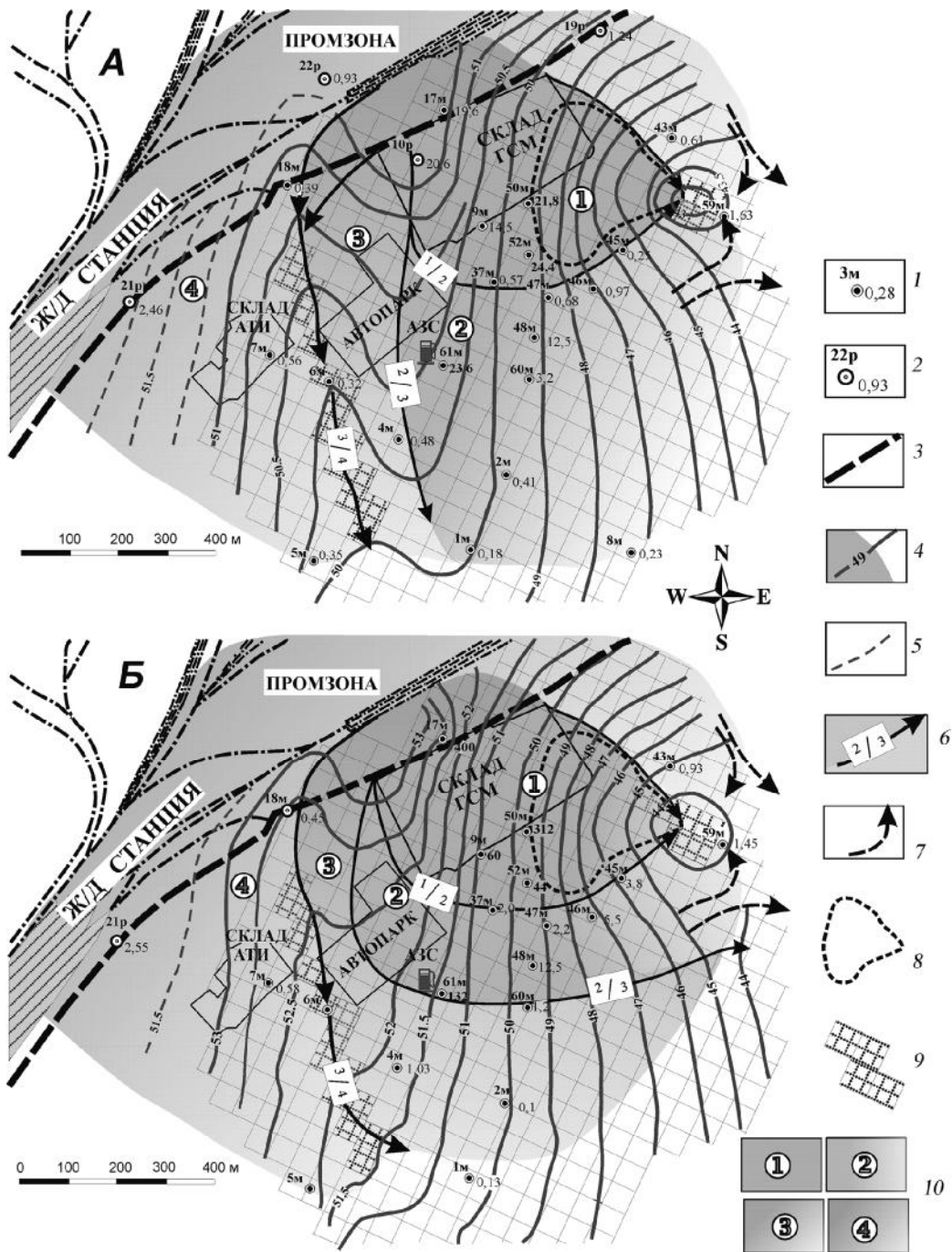


Рис. 3. Схема распространения растворенных УВ в грунтовых водах

А – в летне-осенний период; Б – в зимне-весенний период. Скважины: 1 – мониторинговые, 2 – разведочные (числа: сверху – номер, сбоку – содержание УВ в пробе воды, мг/дм³); 3 – граница территории аэродрома; гидроизогипсы: 4 – по результатам моделирования, 5 – предполагаемые (за пределами модели); линии тока: 6 – по результатам моделирования, разделяющие выделенные зоны распространения растворенных УВ, 7 – показывающие предполагаемое направление распространения растворенных УВ за пределами модели; 8 – контур линзы; 9 – блоки модели на участке ИНП грунтовых вод; 10 – зоны распространения растворенных УВ (цифры в кружочках – номера зон)

почти одинаков. Неравномерное повышение УГВ в весенний период приводит к увеличению бокового притока со стороны зоны 4 на 60%, а со стороны зоны 3 отмечается почти трехкратное уменьшение притока, что связано с существенной трансформацией потока в зонах 2 и 3. Наиболее наглядно изменение структуры потока грунтовых вод, содержащих растворенные УВ, показывает положение линии тока 2/3. Как видно на рис. 3, А, эта линия тока в осенний период направлена с севера на юг. В весенний период (рис. 3, Б) линия тока 2/3, пересекая участок автопарка, круто поворачивает на восток. При этом более чем в три раза уменьшается средняя ширина потока в пределах зоны 2 и примерно в два раза увеличивается скорость фильтрации. В следующий за этим летне-осенний период наблюдается обратная трансформация потока грунтовых вод. Причем заметное изменение структуры потока происходит только в зонах 2 и 3, в зонах 1 и 4 гидроизогибсы перемещаются в основном параллельно друг другу. Поэтому режим фильтрации можно считать квазистационарным.

Если в начале исследований на основании только лишь умозрительного анализа данных мониторинга (см. начало статьи) в качестве источника нефтяного загрязнения юго-западной части исследуемой территории (то есть зоны 4) рассматривался склад ГСМ, то после обработки этих данных на модели стало совершенно понятно, что склад к загрязнению грунтовых вод в этой зоне не имеет никакого отношения. Можно достаточно уверенно утверждать, что основной источник нефтепродуктового загрязнения зоны 4 следует искать в районе железнодорожной станции, т. е. за пределами аэродрома.

Нельзя также исключить влияние эпизодических случаев поступления в ГС относительно небольших порций нефтепродуктового загрязнителя с территории автопарка, склада АТИ и других объектов аэродромного комплекса, которое может проявиться в любой момент в ближайшей от "анонимного" источника загрязнения точке отбора проб воды в виде труднообъяснимого повышения концентрации УВ в водном растворе.

Отдельно следует рассмотреть результаты наблюдений в скв. 59м, расположенной вблизи восточной границы модели на

линии максимальных градиентов потока грунтовых вод. Здесь можно было бы предполагать наиболее интенсивный перенос загрязнителя за пределы исследуемой территории, если бы не эффект "перехвата" загрязненных вод ранее упомянутой воронкой, которая образовалась в результате ИНП через "гидрогеологическое окно". Первые полгода наблюдений с октября 2003 г. по май 2004 г. содержание УВ составляло около 1,5 мг/дм³, что свидетельствует о довольно стабильной миграции загрязнителя в обход воронки. В пробе, отобранной в октябре 2004 г., содержание растворенного в воде УВ уменьшилось в 6 раз. Это, безусловно, связано с влиянием групповой опытно-эксплуатационной откачки, которая как раз в это время проводилась в пределах восточной (низовой) части линзы, где толщина слоя ЛНП до начала откачки достигала 4 м, а через год уменьшилась до 30 см. В этом районе необходимо продолжать наблюдения и после завершения откачки мобильных ЛНП, поскольку в грунтах, как правило, удерживается значительное количество НП, способных длительное время "обогащать" поток грунтовых вод растворенными УВ.

Выводы

- Исследуемая зона загрязнения ГС в пределах территории аэродрома формировалась несколько десятков лет. Можно утверждать, что грунтовые воды загрязнены НП повсеместно, но, разумеется, далеко не равномерно. На большей части территории значения концентраций УВ в воде изменяются от 0,6 до 0,1 мг/дм³. Зато вблизи склада ГСМ, где грунты зоны аэрации удерживают большое количество немобильных НП, отмечается максимальное (близкое к предельному) содержание в пробах воды растворенных УВ. Очевидно, справедливо считать повышенное содержание загрязнителя в грунтовых водах признаком близкого расположения точки опробования к источнику загрязнения. Именно таким образом, по результатам мониторинга автозаправочная станция (АЗС), расположенная в 200 м от площадки склада ГСМ, была идентифицирована как отдельный весьма влиятельный источник загрязнения грунтовых вод. Воз-

можно эпизодические поступления загрязнителя на участках склада АТИ и автопарка. Имеются данные, указывающие на поступление грунтовых вод, содержащих растворенные УВ, из-за пределов аэродрома, со стороны промзоны и железнодорожной станции. Можно априори утверждать, что вторичными источниками загрязнения подземных вод являются грунты, удерживающие НП не только в зоне аэрации, но и в насыщенной зоне, точнее в области фильтрации и вертикального перемещения слоя мобильного ЛНП, вызываемого колебаниями УГВ.

- Особенностью изучения рассматриваемой территории является применение многолетних наблюдений за изменением УГВ и содержанием растворенных в воде УВ. Именно на основании применения мониторинговых исследований в сочетании с моделированием нестационарной фильтрации были выявлены и охарактеризованы:

- зоны ИНП загрязненных НП грунтовых вод;

- эффект частичного перехвата потока загрязненных грунтовых вод воронкообразным понижением УГВ, которое образуется на участке ИНП через "гидрогеологическое окно";

- процесс сезонного изменения гидродинамической структуры потока грунтовых вод, содержащих растворенные УВ.

- Мониторинговые исследования на аэродроме были прекращены в мае 2006 г. по организационно-финансовым причинам. Продолжение мониторинга и получение бо-

лее длительного ряда наблюдений могло бы дать возможность решения задачи распространения растворенных НП с учетом как сезонных, так и многолетних колебаний уровня поверхности грунтовых вод. Принимая во внимание установленную взаимосвязь грунтовых вод с залегающим ниже плиоценовым аллювиальным водоносным горизонтом, системе наблюдений необходимо распространить и на данный горизонт. Выполнение таких исследований позволит разработать более совершенную методику изучения формирования ареалов загрязнения в различных гидродинамических условиях.

1. *Брикс А. Л.* Особенности исследования геологической среды, загрязненной легкими нефтепродуктами, в условиях юга Украины // Геол. журн. – 2010. – № 4. – С. 105–109.

2. *Водообмен* в гидрогеологических структурах Украины: Водообмен в естественных условиях / В. М. Шестопалов, В. И. Лялько, Н. С. Огняник и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 288 с.

3. *Гавич И. К.* Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. – М.: Недра, 1980. – 358 с.

4. *Гольдберг В. М., Газда С.* Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. – М.: Недра, 1984. – 262 с.

5. *Ситников А. Б.* Динамика влаги и солей в почвогрунтах зоны аэрации. – Киев: Наук. думка, 1986. – 152 с

Ин-т геол. наук НАН Украины,
Киев
E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua

Статья поступила
19.10.10