

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ БИОДЕГРАДАЦИИ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НЕФТЕПРОДУКТАМИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е.Н. Шпак

(Рекомендовано д-ром геол.-минерал. наук Н.С. Огняником)

*Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: shpak_lena@yahoo.com
Кандидат геологических наук, научный сотрудник.*

Проведены эколого-геологические исследования загрязненной нефтепродуктами территории в районе военного аэродрома (г. Умань). Выполнены прогнозные расчеты распространения растворенных нефтепродуктов в водоносном горизонте в условиях работы горизонтальной дрены, расположенной в верховьях балки Сухой Яр, с использованием программной системы GMS-6. Оценены роль биodeградации в распространении загрязнения грунтовых вод нефтепродуктами и влияние биodeградации на загрязнение дренажного стока.

Ключевые слова: подземные воды, загрязнение нефтепродуктами, математическое моделирование, биodeградация.

RESEARCH OF BIODEGRADATION EFFECT ON GROUNDWATER CONTAMINATION WITH PETROLEUM PRODUCTS USING MATHEMATICAL MODELING

E.N. Shpak

(Recommended by doctor of geological-mineralogical sciences N.S. Ognianik)

*Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: shpak_lena@yahoo.com
Candidate of geological sciences, scientific researcher.*

Ecological and geological research was carried out at the territory contaminated with petroleum products near the military airfield (Uman town). Spreading of dissolved oil in the aquifer was predicted under conditions of horizontal drainage upper reaches of the Suhoi Yar ravine using GMS-6 program system. The role of biodegradation in groundwater and draining water contamination with oil products was estimated.

Key words: groundwater contamination, petroleum products, mathematical modeling, biodegradation.

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ БІОДЕГРАДАЦІЇ НА ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД НАФТОПРОДУКТАМИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

О.М. Шпак

(Рекомендовано д-ром геол.-мінерал. наук М.С. Огняником)

*Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: shpak_lena@yahoo.com
Кандидат геологічних наук, науковий співробітник.*

Проведені еколого-геологічні дослідження забрудненої нафтопродуктами території в районі військового аеродрому (м. Умань). Виконані прогностичні розрахунки розповсюдження розчинених нафтопродуктів у водоносному горизонті в умовах роботи горизонтальної дрени, розташованої у верхів'ї балки Сухий Яр, з використанням програмної системи GMS-6. Оцінено роль біодеградації у розповсюдженні забруднення ґрунтових вод нафтопродуктами та вплив біодеградації на забруднення дренажного стоку.

Ключові слова: підземні води, забруднення нафтопродуктами, математичне моделювання, біодеградація.

Введение

Опыт эколого-геологических исследований территорий военных аэродромов, проведенных в отделе охраны подземных вод Института геологических наук НАН Украины, показывает, что эти территории, как правило, представляют собой опасные техногенные источники загрязнения геологической среды [Огняник и др., 2002; Briks et al., 2002; Shpak et al., 2003].

К таким объектам относится территория бывшего военного аэродрома (г. Умань), вблизи которого расположена балка Сухой Яр (рис. 1). В конце 2007 г. в верховьях балки было зафиксировано появление нефтепродуктов. На поверхности воды в ручье образовалась пленка нефтепродуктов и присутствовал характерный запах. В связи с возникшей чрезвычайной экологической ситуацией было проведено эколого-геологическое обследование территории с целью определения путей ликвидации загрязнения.

Краткая характеристика района исследований

Территория исследований расположена на северной окраине г. Умань в междуречье Уманка – Каменка. Грунты зоны аэрации представлены толщей средне-верхнечетвертичных лессовидных суглинков мощностью от 2,25 до 8,5 м. Грунтовый водоносный горизонт в средне-верхнечетвертичных суглинках распространен по всей территории. Мощность его не превышает 5 м. Водоупором служит толща красно-бурых глин. Водообильность лессовидных суглинков незначительная, водоносный горизонт эксплуатируется шахтными колодцами, дебиты которых составляют 0,01-0,05 л/с. Питание грунтового водоносного горизонта происходит путем инфильтрации атмосферных осадков, разгрузка осуществляется в балку Сухой Яр и

в результате вертикального перетока в нижележащий водоносный горизонт кристаллических пород.

Результаты эколого-геологического обследования

На основании эколого-геологического обследования установлено, что загрязнение геологической среды возникло в результате потерь нефтепродуктов в период эксплуатации авиационного склада горюче-смазочных материалов. На поверхности грунтового водоносного горизонта в лессовидных суглинках сформировалась линза мобильных нефтепродуктов площадью около 204 480 м² (рис. 2). Мощность линзы в среднем составляла 0,5 м, достигая максимального значения 1,77 м. Выявлено загрязнение грунтовых вод растворенными нефтепродуктами. По данным мониторинга концентрации растворенных нефтепродуктов в водоносном горизонте увеличивались в северной части территории ближе к центру линзы мобильных нефтепродуктов, достигая максимального значения 30,73 мг/л. Нефтепродукты с потоком грунтовых вод попадают в ручей балки Сухой Яр.

На территории исследований проведен комплекс восстановительных работ – откачены мобильные нефтепродукты мощностью 1 м и более. Остаточная мощность слоя мобильных нефтепродуктов составила до 0,2 м. Водоносный горизонт остается загрязненным из-за наличия в нем растворенных нефтепродуктов и дополнительного их поступления с инфильтрацией через загрязненные грунты зоны аэрации. Рекомендовано соорудить горизонтальный дренаж для отбора нефтепродуктов и загрязненных грунтовых вод в области их дренирования в ручей балки Сухой Яр с последующим очищением воды специальными фильтрами.



Рис. 1. Обзорная карта района исследований

1 – граница района работ; 2 – выход нефтепродуктов в урочище Сухой Яр; 3 – траншеи для ликвидации мобильных нефтепродуктов

Fig. 1. General map of the investigated territory

1 – boundary of the investigated territory; 2 – release of petroleum products into Suhoi Yar ravine; 3 – trenches for liquidation of mobile petroleum products

Оценка влияния биодegradации на распространение загрязнения грунтовых вод нефтепродуктами

Проведены исследования с применением математического моделирования для оценки влияния природной биодegradации на распространение загрязнения грунтовых вод нефтепродуктами и на загрязнение дренажного стока. Выполнены прогнозные

расчеты распространения растворенных нефтепродуктов в водоносном горизонте в условиях работы горизонтальной дрены, расположенной в верховьях балки Сухой Яр. Для расчетов использована программная система GMS-6, предназначенная для моделирования фильтрационных (MODFLOW) и миграционных (RT3D) задач [Zheng and Bennett, 1995].

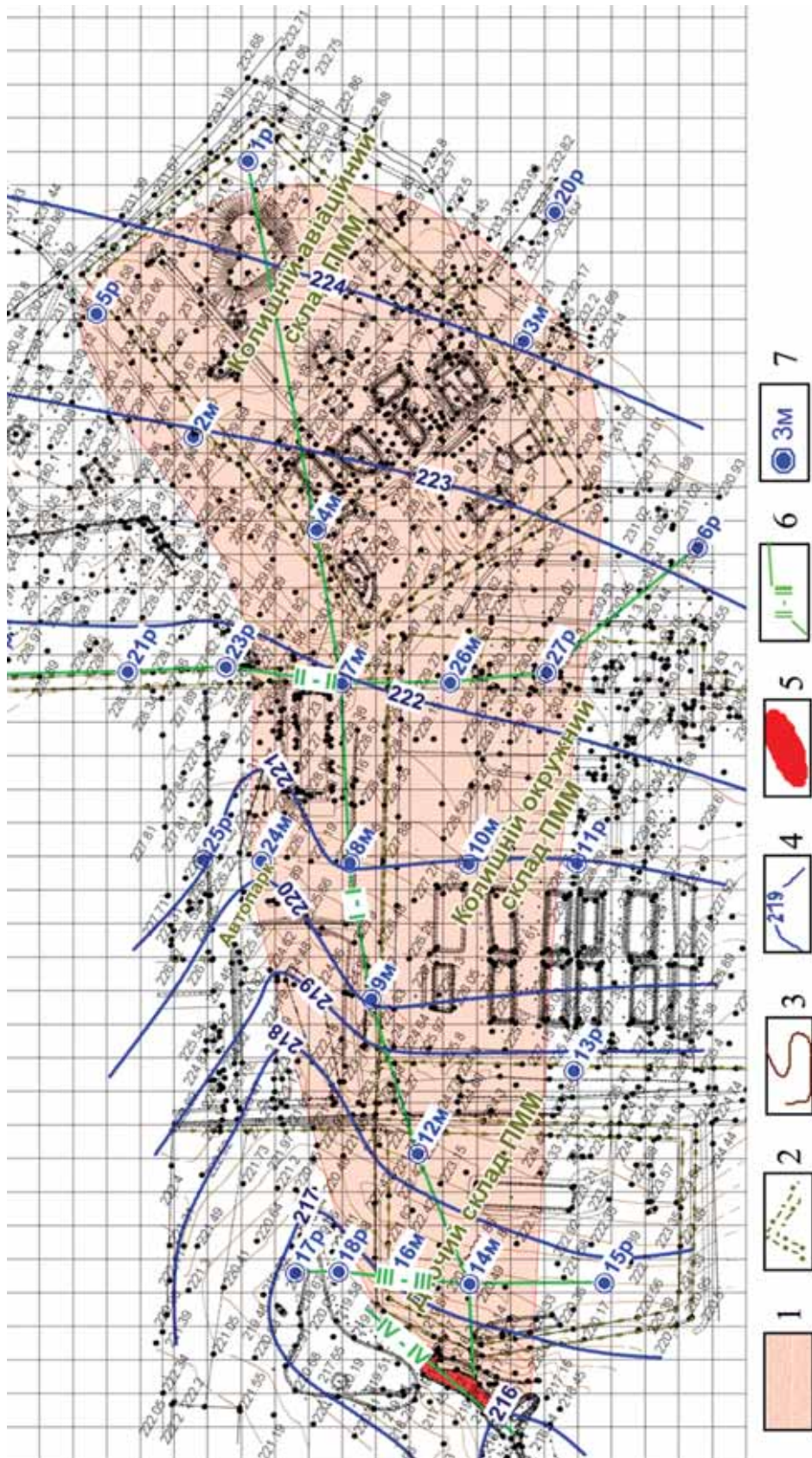


Рис. 2. Карта загрязнения грунтовых вод мобильными нефтепродуктами

1 – линза мобильных нефтепродуктов, 2 – контуры военных объектов, 3 – горизонталы рельефа, 4 – гидроизогипсы грунтового водоносного горизонта, 5 – место дренирования нефтепродуктов в ручей б. Сухой Яр, 6 – линии геолог-гидрогеологических разрезов, 7 – скважины (р – разведочные, м – мониторинговые)

Fig. 2. The map of groundwater contamination with mobile petroleum products

1 – a lens of mobile petroleum products, 2 – contours of military objects, 3 – relief horizontals, 4 – water table contours, 5 – drainage of petroleum products into the stream of Suхой Yar ravine, 6 – lines of geological and hydrogeological crosses, 7 – wells (р – exploring, м – monitoring)

Создана модель первого от поверхности земли водоносного горизонта в средневерхнечетвертичных суглинках с учетом инфильтрационного питания и перетекания в нижележащий водоносный горизонт. Область исследований аппроксимирована прямоугольной сеткой 42 x 20 блоков с постоянным шагом 25 м.

Сначала на модели решалась **фильтрационная задача** в стационарной постановке. По результатам решения идентификационной задачи по известным значениям уровней и инфильтрационного питания получены значения коэффициентов фильтрации и перетекания в нижележащий водоносный горизонт. Перетекание на модели задавалось путем водоотбора в каждом блоке. Горизонтальная дрена задана граничным условием III рода в блоках модели, соответствующих месту природного выхода загрязненных грунтовых вод в балку. Подобранные значения проводимости дрены составляли 8,9-22,7 м²/сут, что позволяло отобразить на модели поток грунтовых вод в балку при снижении уровня воды в дрене 0,5 м.

Далее была решена **миграционная задача** – прогноз распространения растворенных нефтепродуктов в водоносном горизонте. Период моделирования составлял 50 лет. Начальные концентрации нефтепродуктов в водоносном горизонте заданы по данным мониторинга. Наибольшие значения концентраций (30-35 мг/л) заданы в центральной части модели, что соответствует местонахождению линзы мобильных нефтепродуктов до откачки. В целом, концентрации нефтепродуктов уменьшаются по мере удаления от центра линзы, за исключением северной части территории, где концентрации нефтепродуктов составляют преимущественно 20-30 мг/л. В блоках с остаточным слоем нефтепродуктов задавалось также поступление нефтепродуктов с инфильтрационным питанием (20 мм/год) с концентрациями 1,4-2,8 мг/л. Такие значения концентраций нефтепродуктов были получены предварительно математическим моделированием выноса нефтепродуктов с инфильтрацией из загрязненной зоны аэрации, сложенной легкими и средними суглинками. Решалась серия одномерных

вертикальных задач с использованием программного обеспечения VLEACH [Ravi and Johnson, 1997]. В процессе моделирования задавалось поступление инфильтрационного питания в ненасыщенные суглинистые грунты с остаточной мощностью слоя мобильных нефтепродуктов 0,2-0,7 м. На выходе получали концентрации нефтепродуктов, поступающие в водоносный горизонт с инфильтрацией.

Первым вариантом миграционной задачи было моделирование распространения нефтепродуктов в водоносном горизонте без учета биodeградации. Согласно результатам моделирования, на протяжении всего периода моделирования (50 лет) практически весь водоносный горизонт остается загрязненным (рис. 3).

Во *втором варианте* задавалась мгновенная аэробная биodeградация при наличии электронных акцепторов кислорода. Следует отметить, что поскольку фактические данные о наличии акцепторов и их концентраций в грунтовых водах отсутствуют, в этом и последующем вариантах моделирования были использованы литературные данные [Zheng and Bennett, 1995]. Начальные концентрации кислорода задавались равными 9 мг/л. Полученные модельные значения концентраций нефтепродуктов в целом уменьшились по сравнению с первым вариантом. Расходы воды и концентрации нефтепродуктов в блоках, где задана дрена, приведены в таблице. Как видно из таблицы, при наличии кислорода средневзвешенные концентрации растворенных нефтепродуктов в потоке грунтовых вод, разгружающемся в дрину, уменьшаются.

В *третьем варианте* моделирования рассматривалась биodeградация с учетом кинетики процесса при наличии электронных акцепторов кислорода и сульфатов. На модели задавались начальные концентрации кислорода 9 мг/л и сульфатов 90 мг/л. Согласно результатам моделирования, в этом случае загрязнение “локализуется” в центре модельной области, где зафиксированы наибольшие начальные концентрации нефтепродуктов, а на остальной территории загрязнение уничтожается под воздействием биodeградации. При этом максимальные модельные значения концентраций

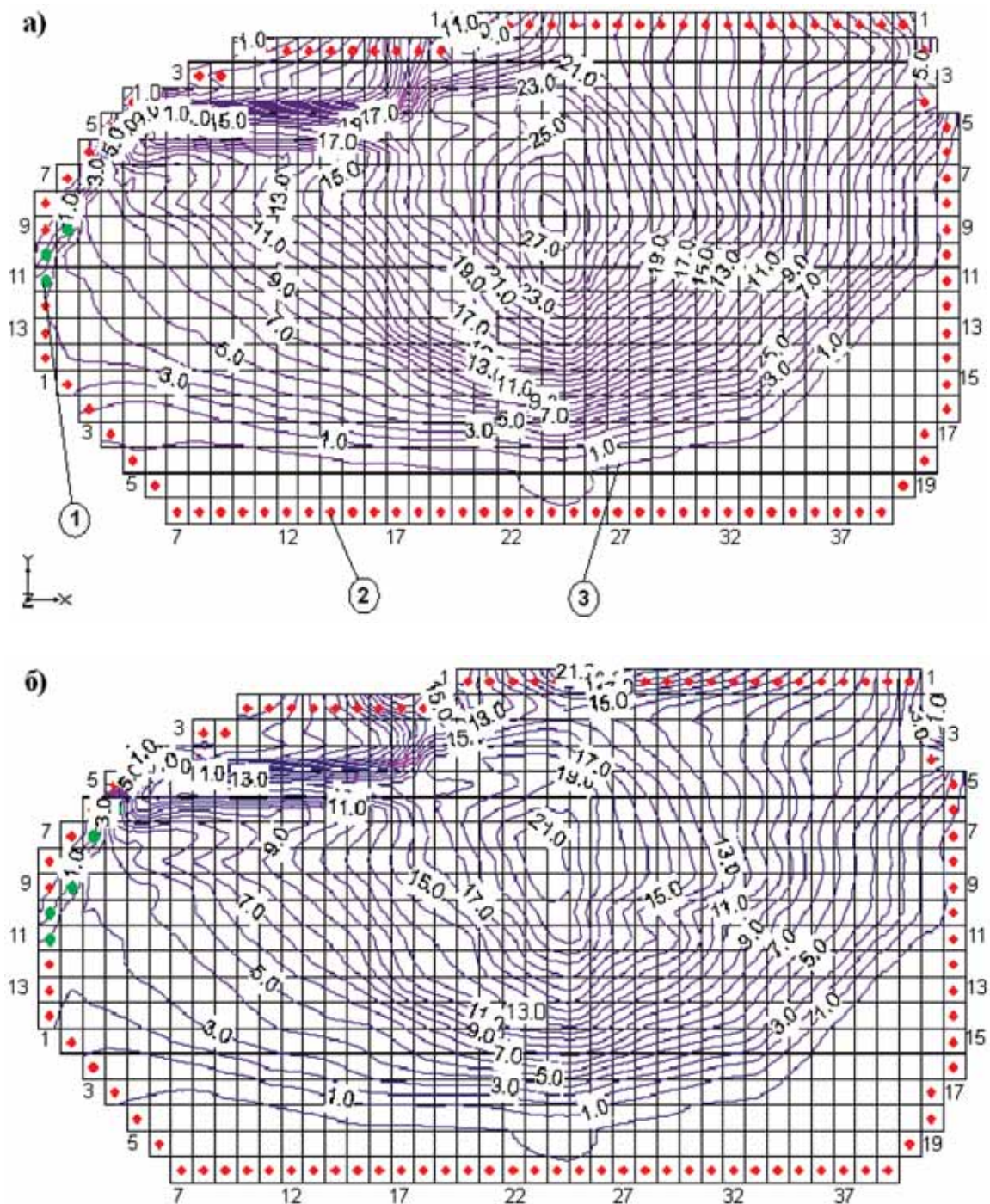


Рис. 3. Результаты моделирования распространения растворенных нефтепродуктов в средне-верхне-четвертичном водоносном горизонте без учета биодegradации: а) период моделирования 25 лет; б) период моделирования 50 лет

1 – в блоке задана дрена; 2 – в блоке задано ГУ I рода $H = \text{const}$; 3 – изолинии концентраций нефтепродуктов

Fig. 3. The results of modeling of dissolved petroleum product spreading in Middle-High Quaternary aquifer without biodegradation: a) modeling time is 25 years; b) modeling time is 50 years

1 – a drain is specified in a node; 2 – a constant head is specified in a node; 3 – isolines of petroleum product concentrations

Расходы воды и концентрации нефтепродуктов в дрене по результатам математического моделирования

Water flow rates and petroleum product concentrations by the results of mathematical modeling

Блоки модели x, y	Расход воды Q _i (м ³ /сут)	Концентрации нефтепродуктов C _i при отсутствии биodeградации (мг/л)			Концентрации нефтепродуктов C _i при мгновенной аэробной биodeградации (мг/л)		
		10 лет	25 лет	50 лет	10 лет	25 лет	50 лет
1/11	3,96	2,5	3,03	3,03	0,22	1,16	1,86
1/10	5,06	1,49	1,4	1,21	0,56	0,85	0,92
2/9	5,4	1,98	1,86	1,56	1,02	1,19	1,16
2/8	6,48	0,33	0,36	0,31	0,21	0,27	0,25
3/7	11,44	0,96	0,85	0,68	0,6	0,62	0,54
4/6	12,1	4,55	5,91	6,37	3,16	4,81	5,6
	ΣQ _i = 44,44	C _{срв.} = 2,17	C _{срв.} = 2,54	C _{срв.} = 2,55	C _{срв.} = 1,25	C _{срв.} = 1,85	C _{срв.} = 2,11

Примечание: C_{срв.} – средневзвешенные концентрации нефтепродуктов в дрене: $C_{срв.} = \frac{\sum(Q_i \cdot C_i)}{\sum Q_i}$, где Q_i – расход воды в i-м блоке дрены; C_i – концентрация нефтепродуктов в i-м блоке дрены.

нефтепродуктов в три раза меньше по сравнению с первым вариантом моделирования. Только через 50 лет концентрация нефтепродуктов в блоке 4/6, где задана дрена, достигнет 0,1 мг/л (рис. 4). Таким

образом, при наличии сульфатов и растворенного кислорода в грунтовом водоносном горизонте область загрязнения и концентрации нефтепродуктов существенно уменьшатся в результате биodeградации.

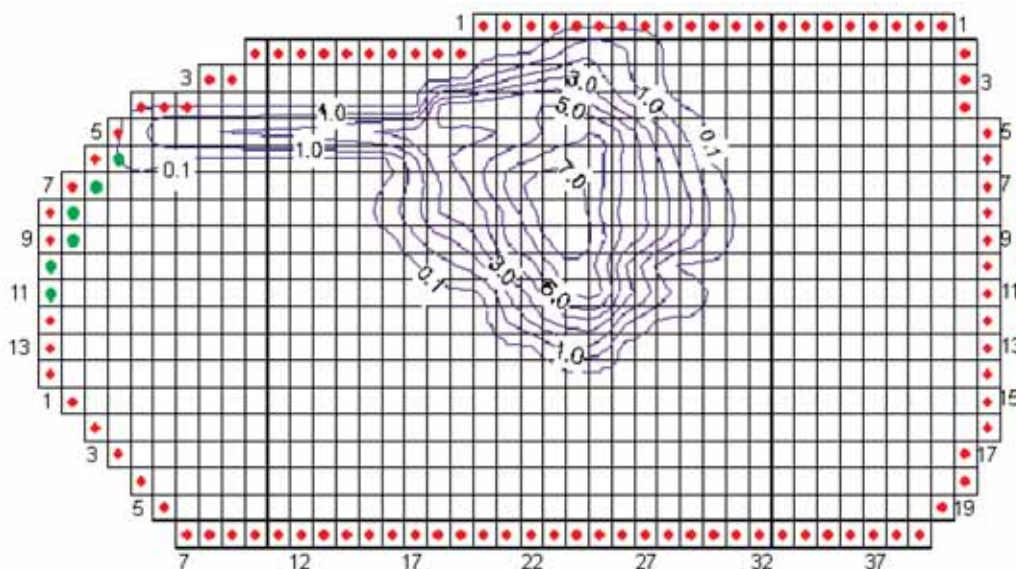


Рис. 4. Результаты моделирования распространения растворенных нефтепродуктов в средне-верхне-четвертичном водоносном горизонте в условиях биodeградации с учетом кинетики процесса при наличии электронных акцепторов кислорода и сульфатов (период моделирования 50 лет)

Fig. 4. The results of modeling of dissolved petroleum product spreading in Middle-High Quaternary aquifer under biodegradation kinetics with oxygen and sulfate electron acceptors (modeling time is 50 years)

Выводы

Результаты математического моделирования показали эффективность влияния природной биодegradации на загрязнение грунтового водоносного горизонта растворенными нефтепродуктами:

- ◆ при отсутствии биодegradации практически весь водоносный горизонт остается загрязненным;
- ◆ при мгновенной аэробной биодegradации при наличии электронных акцепторов кислорода водоносный горизонт остается загрязненным, но концентрации нефтепродуктов уменьшаются;
- ◆ при биодegradации с учетом кинетики процесса при наличии электронных акцеп-

торов кислорода и сульфатов область загрязнения и концентрации нефтепродуктов значительно уменьшается в результате биодegradации, и только через 50 лет загрязнение достигнет дрены.

Полученные результаты моделирования требуют уточнения данных о наличии электронных акцепторов и их концентраций в грунтовых водах, а также об изменении концентраций во времени путем проведения специальных исследований и мониторинга. Следует определить концентрации нефтепродуктов в ручье, который протекает по балке Сухой Яр, и путем решения обратной задачи рассчитать скорость природной биодegradации.

Список литературы / References

1. Огняник Н.С., Шпак Е.Н., Голуб Г.И., Негода Ю.А., Наседкина О.И. Оценка эколого-геологического состояния территории авиабазы в связи с загрязнением грунтов и подземных вод нефтепродуктами. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2002. № 5-6. С. 71–76.

Ognianik N.S., Shpak E.N., Golub G.I., Negoda Y.A., Nasedkina O.I., 2002. Assessment of ecological and geological state of military airbase territory due to soil and groundwater contamination with petroleum products. *Ecologiya dovkilliya ta bezpeka zhittedyalnosti*, № 5-6, p. 71–76 (in Russian).

2. Briks A.L., Negoda Y.O., Shpak O.M. Using computer modelling for predictions of groundwater contamination with petroleum products in the area of Lutsk aerodrome and development of actions to localize contamination: *Proceedings of the 2-nd International Conference "IAP 2002"*, May 27-30, 2002. Miskolts, Hungary, 2002. P. 99.

Briks A.L., Negoda Y.O., Shpak O.M., 2002. Using computer modelling for predictions of groundwater contamination with petroleum products in the area of Lutsk aerodrome and development of actions to localize contamination: *Proceedings of the 2-nd International Conference "IAP 2002"*, May 27-30, 2002, Miskolts. Hungary, p. 99 (in English).

3. Shpak E., Ognianik N., Negoda Y., Golub G. Assessment of military airbase impact on the environment: *Proceedings of the 4th International Conference CERECO'2003*. Miskolc, Hungary, 2003. P. 366-369.

Shpak E., Ognianik N., Negoda Y., Golub G., 2003. Assessment of military airbase impact on the environment: *Proceedings of the 4th International Conference CERECO'2003*. Miskolc, Hungary, p. 366-369 (in English).

4. Zheng C. and Bennett G.D. Applied contaminant transport modeling: theory and practice. Van Nostrand Reinhold. New York, 1995. 440 p.

Zheng C. and Bennett G.D., 1995. Applied contaminant transport modeling: theory and practice. Van Nostrand Reinhold. New York, 440 p. (in English).

5. Ravi V. and Johnson J.A. A One-Dimensional Finite Difference Vadose Zone Leaching Model. Center for Subsurface Modeling Support, 1997. 70 p. Available at: www.epa.gov/ord/NRMRL/gwerd/csmos/models/vleach.html.

Ravi V. and Johnson J.A., 1997. A One-Dimensional Finite Difference Vadose Zone Leaching Model. Center for Subsurface Modeling Support, 70 p. Available at: www.epa.gov/ord/NRMRL/gwerd/csmos/models/vleach.html (in English).

Статья поступила
04.03.2014