

МУЛТИДИСЦИПЛИНАРЕН ПОДХОД ЗА СИМУЛИРАНЕ НА 3D СРЕДАТА ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ЗАМЪРСЯВАНЕТО НА ПОДЗЕМНИТЕ ВОДИ

Николай Стоянов, Георги Айданлийски

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", София 1700, България, E-mail:nts@staff.mgu.bg; ajdansky@staff.mgu.bg

РЕЗЮМЕ

Създаването на точни модели за прогнозиране и управление на процесите на замърсяване на подземните води в резултат на редица природни и техногенни фактори (минно-добивна дейност, промишлени производства, селско стопанство, депа за отпадъци и др.) изисква все по-детайлно познаване на строежа и морфологията на водоносните хоризонти. Голяма част от подобни обекти са локализирани в седименти и седиментни скали със значителна хетерогенност на литоложките свойства, пораждаща твърде голяма нееднородност на порестата среда. В досегашната практика при математическото моделиране на процесите на замърсяване на подземните води, не винаги достатъчно реалистично се отчита степента и спецификите на тази хетерогенност.

В последните години, обаче, при съставянето на 3D прогнозни модели все по-голямо значение придобива седиментологията на водоносните хоризонти. Този сравнително нов подход включва прилагането на комплекс от преки и косвени полеви и лабораторни седиментоложки, стратиграфски и геофизични методи, които позволяват коректно отделяне и дефиниране на различни по ранг и мащаб литофациални и архитектурно-елементни единици. Всяка една от тях се характеризира с относителна вътрешна хомогенност на хидродинамичните и миграционните свойства. Това позволява при съставянето на числови 3D прогнозни модели с лекота и с достатъчна точност да се отделят зони и пластове, симулиращи конкретната хидрогеоложка обстановка. Предлаганият мултидисциплинарен подход е апробиран с успех от авторите на примера на Депото за твърди битови отпадъци на гр. Пловдив.

ВЪВЕДЕНИЕ

Основен обект на техногенното замърсяване и потенциален преносител на различни замърсители са подземните води. Главен фактор, лимитиращ поведението на замърсителите в подземната хидросфера са хидрогеоложките условия в района на потенциалния (или реалния) източник на замърсяване. Ето защо, от съществено значение при изследването на този феномен са доброто познаване и коректната симулация на конкретната хидрогеоложка обстановка.

ХЕТЕРОГЕННОСТ НА ПОРЕСТАТА СРЕДА И ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА НЕЙНАТА КОРЕКТНА СИМУЛАЦИЯ

Водоносните структури (резервоарите на подземни води) много често се формират в нееднородни седименти и седиментни скали. Литоложката хетерогенност обуславя значителното разнообразие в размерите и геометрията на поровото пространство и закономерно води до голяма пространствена изменчивост на хидродинамичните и миграционните характеристики на водовместващата (порестата) среда. За съжаление, прилаганите симулационни техники и подходи при съставяне на филтрационни и масо-транспортни модели не винаги достатъчно реалистично отчитат степента и спецификата на тази хетерогенност. Този факт до голяма степен предопределя неточността на прогнозните модели и свързаните с това усилия за негово елиминиране.

В досегашната практика широко се използват няколко основни подхода за моделиране движението на замърсителите във водоносните структури: опростен, стохастичен и детерминистичен.

Опростеният подход се основава на допускането, че водонаситената среда е относително еднородна (квазихомогенна) по отношение на хидрогеоложките параметри. За водоносни хоризонти, състоящи се от няколко водоносни и водоупорни пласта, се приема, че всеки от тях е квазихомогенен и най-често хоризонтален. При опростения подход разпространението на консервативните (инертните) замърсители във водоносните пластове се описва достатъчно добре с конвективно-дисперсионното уравнение (Bear, 1972). Поведението на взаимодействията с водовместващата среда замърсители се моделира с математически зависимости, описващи кинетиката на процесите на обратимо и необратимо елиминиране (Bear, 1979; Freeze and Cherry, 1979). Обратимото елиминиране (сорбция-десорбция) се описва по линейната изотерма на Непгу и се характеризира чрез коефициента на разпределение K_d , респ. със сорбционната порестост n_s . Необратимото елиминиране (хидролитично разпадане и утаяване) се описва по реакцията на необратимо елиминиране от първи ред и се определя от елиминационната константа γ . Ще отбележим, че този твърде разпространен в миналото подход може да се използва (с достатъчна точност) в

много ограничени рамки и при значително идеализиране (схематизация) на хидрогеоложката обстановка. Той е валиден единствено в локален мащаб и за хомогенна среда.

Стохастичният подход е развит и широко използван в практиката в последните 20 години. При него движението на замърсителите в нехомогенна среда се описва с полуаналитични модели, в които геоложките единици се представят посредством пространствено корелиране на случайните (random) полета (Dagan, 1989; Gelhar, 1993) или чрез фрактално разпределение, наложено върху хомогенни или слабо вариращи пространствени трендове (Wheatcraft и Tyler, 1988). Разглежданията се правят въз основа на допускането, че пространствената изменчивост е малка. Това до голяма степен пренебрегва реалното съществуване на различни по ранг и мащаб литофациални и архитектурно-елементни единици, които в действителност определят вътрешните и външните гранични условия във филтрационната област и строго рамкират възможните пътища за разпространение на замърсителите. Без съмнение, коректна математическа симулация на възможното движение на замърсителите да се прави само след прецизно детерминиране на седиментоложките взаимовръзки от различен мащаб.

Детерминистичният подход има претенциите да симулира с максимална достоверност реалната хетерогенност на природния обект, като в подповърхностното пространство се отделят и опишат хомогенни по отношение на хидродинамичните и миграционните характеристики тримерни обекти (пластове и зони). Детерминирани по този начин обекти могат да се разглеждат като основни архитектурни елементи, изграждащи водоносните структури. В рамките на всеки квазихомогенен обект движението на замърсителите достатъчно точно се описва с математически апарат, използван при опростения подход. При съставяне на регионални математически модели за прогнозиране на замърсяването на подземните води всеки елемент се включва като тримерен обект с установени геометрия и свойства (коефициент на филтрация k , дисперсивност α , активна и сорбционна порестост n_0 и n_s , коефициент на елиминиране γ и др.). В този случай с лекота могат да бъдат ползвани стандартизираните от USGS и EPA и широко прилагани в световната практика програмни пакети MODFLOW и MT3D (Andersen, 1993; McDonald и Harbaugh, 1988; Zheng, 1990 и др.).

Използването на обичайни хидрогеоложки техники и методи при прилагане на детерминистичния подход най-често се съпътства от значителни трудности. Опитите тримерните обекти да се детерминират въз основа на статистическа обработка на резултатите от полеви и лабораторни филтрационни тестове (Боревский и др., 1973, Мироненко и Шестаков 1976, и др.) показват, че подобни изследвания могат да са обект на чисто теоретични разработки и нямат особено значение в практиката, тъй като статистическите методи изискват провеждането на многочислени тестове в различни точки на подповърхностното пространство, което е свързано с необосновано големи финансови разходи.

Големи предимства има широко лансираната през последните няколко години нова за хидрогеоложката практика модификация на детерминистичния подход, известен в специализираната литература с името *седиментология на водоносните хоризонти (aquifer sedimentology - Huggenberger and Aigner, 1999)*. Този седиментоложки подход включва прилагането на комплекс от преки и косвени полеви и лабораторни седиментоложки, стратиграфски и геофизични методи, които позволяват коректно определяне на различни по ранг и мащаб литофациални и архитектурно-елементни единици. Всяка от тези единици се характеризира с относително вътрешна хомогенност на хидрогеоложките характеристики. Подходът позволява с ограничен брой лабораторни и полеви хидрогеоложки тестове да се направи добър и сравнително точен 3D модел, отразяващ естествената хетерогенност на средата. Надеждността на прогнозния модел твърде много зависи от прецизната корелация между хидродинамичните и миграционните характеристики и съществуващата 3D изменчивост. Ценовата ефективност и други практически съображения обаче обикновено ограничават броя на проучвателните сондажи и хидрогеоложките тестове, което снижава точността на симулацията. Този факт, разбира се, не може да намали значението на предложения подход, тъй като за всеки отделен обект, в зависимост от неговата значимост, е възможно да се прецени и оптимизира съотношението (финансови разходи)/(точност на прогнозата). Дори в някои случаи, особено за предварителни оценки и прогнози, може да се ползва предложената по-долу корелационна зависимост на коефициента на филтрация от едрината на зърната в преобладаващата фракция и степента на сортировка.

СЕДИМЕНТОЛОГИЯ НА ВОДОНОСНИТЕ СТРУКТУРИ

Както вече бе отбелязано, седиментоложният подход успешно се използва за решаване на хидрогеоложки задачи. Често, особено когато са локализираны в алувиални наслаги, водоносните хоризонти показват широк спектър на литоложка и фациална изменчивост, които в значителна степен предопределят хидродинамичните и миграционните свойства на средата. През последните години се правят редица опити тези нееднородности да се характеризират и систематизират качествено и количествено под формата на йерархична система (напр., van de Graaff and Ealey, 1989; Dreyer, 1993). Съгласно Huggenberger and Aigner (1999) в пределите на подобна йерархична схема на степента на литоложка нееднородност, индивидуалните подразделения могат да бъдат разглеждани както като генетични седиментоложки единици, така и като хидрогеоложки единици, например:

- гига-мащабна литоложка нееднородност, обусловена от развитието на седиментния басейн. Контролира границите и вътрешната структура на цели водоносни басейни;
- мега-мащабна литоложка нееднородност, обусловена от типа седиментационна обстановка. Характеризира пространствените взаимоотношения на водоносните хоризонти и комплекси във водоносните басейни;
- макро-мащабна литоложка нееднородност,

обусловена от локалната фациалната динамика на седиментонатрупването. Определя морфологията и вътрешната структура на отделните водоносни и водоупорни пластове;

- мезо-мащабни текстурни и структурни вариации, обусловени от седиментационната динамика. Поделва водоносните пластове на зони с различни хидрогеоложки характеристики;
- микро-мащабни различия в петрографията, пористостта и проницаемостта, обусловени особеностите на седиментното подхранване и диагенезата на акумулираните седименти. Детайлизира процесите на филтрация и масо-транспорт на микро ниво (в поровите канали).

Основен инструмент при провеждане на макро- и мезо-мащабни изследвания на седиментологията на водоносни хоризонти, локализиращи в алувиални последователности, е архитектурно-елементният анализ. Той се базира на разбирането, че алувиалните седиментни последователности са изградени от осем на брой градивни единици, наречени "архитектурни елементи" (Allen, 1983; Miall, 1985, 1988). Идентифицирането и характеристиката на тези елементи са възможни в значими по площ дву-, а при възможност и тримерни разкрития. Дефинирането на единиците се основава както на тяхната външна форма, предопределена от характера на ограничаващите ги повърхности, така и от организацията на вътрешния им строеж. Тези белези отразяват различния стил и динамика на нарастване на седиментните тела и в повечето случаи са свързани с морфоложки белези от мащаб на комплексните седиментни макроформи. Въпреки някои вариациите в отделни детайли от характеристиките им е възприето, че повечето алувиални отложения са изградени от комбинация в различни пропорции на тези осем елемента и техните разновидности.

Описанието и дефинирането на архитектурните елементи включва:

- Природа и морфология на ограничителните повърхности;
- Мащаб на единицата: дебелина, латерално (паралелно и перпендикулярно на посоката на седиментен палеотранспорт) разпространение;
- Външна геометрия на единицата;
- Вътрешен строеж на единицата: латерални и вертикални литофациални ансамбли и последователности, наличие и ориентация на нискорангови ерозионни повърхности, ориентация на индикаторите на посоката на седиментен палеотранспорт, взаимоотношения на слоестостта спрямо ограничаващите повърхности.

Прилагането на архитектурно-елементния анализ при изучаване на алувиални последователности значително опростява тяхното седиментолошко моделиране като при

това се повишава точността и устойчивостта на прогнозния математически модел.

МУЛТИДИСЦИПЛИНАРЕН ПОДХОД ЗА СИМУЛИРАНЕ НА 3D СРЕДАТА В МАТЕМАТИЧЕСКИЯ МОДЕЛ НА ЗАМЪРСЯВАНЕТО НА ПОДЗЕМНИТЕ ВОДИ В РАЙОНА НА ДТБО ПЛОВДИВ

Депото за твърди битови отпадъци (ДТБО) на гр. Пловдив е изградено в кватернерни и отчасти в неогенски, рахли, предимно алувиални седименти. Най-горната част на седиментния разрез в района на и около депото е представен от четири, разположени един над друг алувиални цикъла. Дебелината на отделните цикли е в границите на 8-13 m и варира по площ. Само най-горният от тези цикли има разкритост на повърхността, но поради характера на изграждащите го седименти, тази разкритост е твърде ограничена. Ето защо, вместо стандартния при провеждане на архитектурно-елементен анализ подход, намирането на необходимата за неговото реализиране информация в по-голямата част от район се сведе до:

- изучаване на вертикалните литофациални последователности;
- системно измерване на всички типове индикатори на посоката на седиментен палеотранспорт;
- детайлно изучаване на морфологията и ориентировката на ограничителните повърхности на отделените литофациални единици.

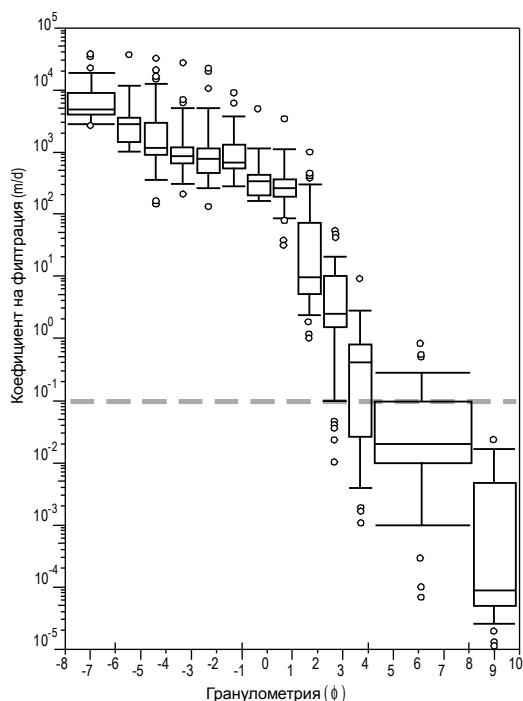
В резултат от тези изследвания в алувиалните наслаги са идентифицирани и характеризирани 10 литофациални разновидности и 6 типа архитектурни елемента. При описанието на архитектурните елементи в настоящото изследване е възприета схемата на Miall (1996), в която са направени известни изменения и допълнения.

За постигане на коректен модел на алувиалните отложения бяха изучени групи от внимателно корелирани разкрития, разположени напречно и надлъжно на доминиращите палеотранспортни направления. Събраните от тях данни са използвани при интерпретацията на резултатите от многочислените проучвателни сондажи в района. На тази основа са разработени мрежа от профили, обхващащи цялата територия около депото, които илюстрират пространственото разпределение на отделените алувиални цикли. В рамките на всеки цикъл са илюстрирани пространствените взаимоотношения на изграждащите го архитектурно-елементни единици.

Въз основа на многочислени зърнометрични анализи са определени степента на сортираност на седиментите от всяка отделна литофациална единица, а от тук и на изгредените от тях архитектурно-елементни единици. Предсвянето и анализът на данните на основа на стандартна фискала позволи хидродинамична и генетична интерпретация на отделените седиментните тела.

Основавайки се на получените от много автори връзки между гранулометричната характеристика и степента на

сортираност на седиментите от една страна и техният коефициент на филтрация от друга (по данни от Виссмен, и др., 1979; Де Уист, 1969; Daly, 1982; Davis and DeWiest, 1966; Morris and Johnson, 1967; и др.), е съставена корелационна диаграма (фиг. 1), позволяваща литофациалните и архитектурно-елементните единици да се интерпретират като хидрогеоложки единици (водоносни пластове и зони с конкретна геометрия и характеристики). С нейна помощ, на първо приближение, в подповърхностното пространство в района на ДТБО Пловдив са детерминирани два водоносни и един водоупорен пласт. Във водоносните пластове са отделени зони с различна проводимост, а във водоупорния глинест пласт са локализирани редица прекъсвания, т.нар. хидрогеоложки прозорци.



Фигура 1. Корелационна бокс-диаграма на типа седменти и коефициента на филтрация. Плътната пунктирана линия показва границата между проницаемите и практически непроницаемите седименти. С кръгчета са дадени стойностите, характерни за много добре сортираните и лошо сортираните разновидности.

По данни от направените лабораторни и полеви филтрационни и индикаторни опити, за всеки пласт и зона, са присвоени стойности на характеризиращите ги хидродинамични и миграционни параметри. Така е създаден сравнително точен 3D модел на подповърхностното пространство в района на ДТБО Пловдив. Този модел е успешно използван от авторите за прецизно симулиране на водоносните пластове и зони (потенциалната среда за разпространение на замърсителите) във филтрационната област при съставянето на математически модел за прогнозиране на развитието на процесите на замърсяване на подземните води от сметицето.

ЛИТЕРАТУРА

- Боревский, Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин, Л.С., 1973. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. - Недра, Москва, 1973, 304 с.
- Виссмен, У., Хорбаф, Т.И., Кнэпп, Д.У., 1979. Введение в гидрологию. - Гидрометеиздат, Ленинград.
- Де Уист, Р., 1969. Гидрогеология с основими гидрогеологии суши. - МИР, Москва, с. 311.
- Мироненко, В.А., Шестаков, В.М., 1978. Теория и методы интерпретации опытно-филтрационных работ. - Недра, Москва, 1978, 325 с.
- Allen, J.R.L., 1983. Studies in Fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders. - Sediment. Geol., 33: 237-293.
- Andersen, P.F., 1993, A manual of instructional problems for the U.S.G.S. MODFLOW MODEL, Dynamac contract 68-C8-0058 with the U.S. Environmental Protection Agency, R.S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK 74820.
- Bear, J., 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. - Elsevier, New York.
- Bear, J., 1979. Hydraulics of Groundwater. - McGraw-Hill, New York.
- Dagan, G., 1989. Flow and Transport in Porous Formations. - Springer, Berlin.
- Daly, C., 1982. Evaluation of procedures for determining selected aquifer parameters. Prepared for U.S. Army Toxic Hazardous Materials Agency, CR REL Report 82-41.
- Davis, S., and J.M DeWiest, 1966. Hydrogeology. New York: Wiley, P. 463
- Dreyer, T., 1993. Geometry and facies of large-scale flow-units in fluvial dominated fan-delta front sequence. - Advances in reservoir geology. Geol. Soc. London, Spec. Publ. 69: 135-174.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. Groundwater. - Printice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New York, 604 pp.
- Gelhar, L. W., 1993. Stochastic Subsurface Hydrology. - Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York.
- Huggenberger, P., T. Aigner, 1999. Introduction to the special issue on aquifer-sedimentology: problems, perspectives and modern approaches. - Sed. Geol., 129: 179-186.
- McDonald, J.M. and A.W. Harbaugh. 1988. A modular three-dimensional finite-difference flow model. - Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 6. 586 pp.
- Miall, A.D., 1985. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. - Earth-Science Reviews, 22: 261-308
- Miall, A.D., 1988. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: Anatomy of the Kayenta formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado. - Sedimentary Geology, 55: 233-262
- Miall, A.D. 1996. The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology. - Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 582
- Morris, D.A., and A.I. Johnson, 1967. Summary of hydrological and physical properties of rock and soil materials as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey. USGS Water Supply Paper 1839-D.
- van de Graaff, W. J. E., P. J. Ealey, 1989. Geological modeling

for simulation studies. – Bull. Am. Assoc. Pet. Geol., 73:
1436-1444

Wheatcraft, S. W., Tylor, S. W., 1988. An explanation of
scale-dependent dispersivity in heterogeneous aquifers
using concepts of fractal geometry. - Water Resour. Res.
24, 566-578.

Zheng, C. 1990. A modular three-dimensional transport model

*Препоръчана за публикуване от
катедра "Хидрогеология и инженерна геология" на ГПФ*

for simulation of advection, dispersion and chemical
reaction of contaminants in groundwater systems,
Prepared for the U.S. Environmental Protection Agency,
R.S. Kerr Environmental Research Laboratory Ada, OK
74820.

COMPREHENSIVE APPROACH FOR 3D SIMULATION BY MATHEMATICAL MODELING OF GROUNDWATER CONTAMINATION

Nikolay Stoyanov, George Ajdanlijsky

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia 1700, Bulgaria, E-mail: nts@staff.mgu.bg; ajdanskyy@staff.mgu.bg

ABSTRACT

Development of precise models for predicting and managing processes of groundwater contamination as a result of a number of natural and technogenic factors (mining activity, industry, agriculture, sanitary landfills, etc.) requires more detailed knowledge on the structure and morphology of aquifers. Some of the aquifers are located in sediments and sedimentary rocks of significant heterogeneity of the lithological properties, causing a rather high heterogeneity of porous medium. Past practice of mathematical modeling has not considered realistically enough the rate and specifics of this heterogeneity.

In recent years, sedimentology of aquifers acquires higher importance in the compilation of 3D prediction models. This comparatively new approach allows the application of a set of direct and indirect "in situ" and laboratory sedimentological, stratigraphic and geophysical methods, which allow the correct differentiation and definition of lithofacial and architectural-element units of different rank and scale. Each of them is characterized by relative inner homogeneity of hydrodynamic and migration properties. Thus, the differentiation of zones and layers simulating the correct hydrogeological conditions is allowed easily and precisely enough by compilation of numerical 3D models.

The comprehensive approach was successfully tested at the Plovdiv sanitary landfill.

INTRODUCTION

Groundwater is the main object of technogenic contamination and potential carrier of different contaminants. Hydrogeological conditions in the area of potential (or real) source of contamination are the major factor, limiting the behaviour of contaminants within the underground hydrosphere. For that reason good recognition and correct simulation of particular hydrogeological medium is so important.

HETEROGENEITY OF POROUS MEDIUM AND OPPORTUNITIES FOR ITS CORRECT SIMULATION

Aquifers (groundwater reservoirs) are often formed in non-homogeneous sediments and sedimentary rocks. Lithologic heterogeneity determines the significant variety in dimensions and geometry of porous medium and regularly brings to area variation of hydraulic and migration characteristics of water-bearing (saturated) medium. Unfortunately, simulation approaches for compilation of flow and mass-transport models has not considered yet the rate and specifics of this heterogeneity realistically enough. This fact predetermines the inaccuracy of prediction models and subsequent efforts for their elimination.

Recent practice widely applies several approaches for modeling the movement of contaminants in aquifers: simplified, stochastic and deterministic.

The simplified approach is based on the adoption that saturated medium is relatively homogeneous (quasihomogeneous) in the aspect of hydrogeological parameters. Each of the water-bearing layers, consisting of several aquifers and aquitards is considered quasihomogeneous and horizontal. In the simplified approach the distribution of conservatives (inert) contaminants in the aquifers is described well by the convection-disperse equation (Bear, 1972). Behaviour of contaminants with water-bearing medium is modeled by mathematical dependencies, describing the kinetics of processes of reversible and non-reversible elimination (Bear, 1979; Freeze and Cherry, 1979). The reversible elimination (sorption-desorption) is described by the linear isotherm of Henry and is characterized by the coefficient of distribution K_d , with sorptional porosity n_s , re-

spectively. Non-reversible elimination (hydraulic decay and precipitation) is determined by the reaction of non-reversible elimination of first order and by the elimination constant γ . It is worth mentioning that this approach, widely applied in the past, may be used (with a sufficient precision) in a very limited number of cases and significant schematization of the hydrogeological background. It is valid within a local scale and a homogeneous media only.

The stochastic approach is developed and widely used in practice in the last 20 years. Movement of contaminants in the non-homogeneous medium is described by area correlation of random fields (Dagan, 1989; Gelhar, 1993) or by fractal distribution, laid over homogeneous or slightly varying trends (Wheatcraft and Tylor, 1988). Considerations are based on the adoption that area variation is small. This brings to the negligence of real existence of lithofacial and architectural-element units of different rank and size, which in fact determine the inner and outer boundary conditions in the flow area and strictly frame the possible ways for distribution of contaminants. No doubt, possible movement of contaminants is correctly modeled mathematically only after precise determination of sedimentologic interconnection of different scale.

The deterministic approach pretends to simulate the real heterogeneity of natural objects with a maximum reliability. 3-D objects, homogeneous with respect to hydraulic and migration characteristics (layers and zones) are differentiated and described in the subsurface area. Objects, determined by this approach are treated as main architectural elements of the water-bearing structures. Movement of contaminants is described precisely enough by the mathematical means, applied by the simplified approach within each quasihomogeneous object. In the compilation of regional mathematical models for prediction of groundwater contamination, each element is included as a 3-D object with established geometry and properties (hydraulic conductivity k , dispersivity α , effective and sorptional porosity n_0 and n_s , elimination constant γ etc.). In this case software packages MODFLOW and MT3D, standardized by USGS and EPA and widely applied in the world practice may be used (Andersen, 1993; McDonald и Harbaugh, 1988; Zheng, 1990 et al.).

The application of traditional hydrogeological means and

vehicles to the deterministic approach most often brings to difficulties. The attempts to determine 3-D objects based on statistical processing of results from "in situ" and laboratory filtration (hydraulic) tests (Боревский и др., 1973, Мироненко и Шестаков 1976, etc.) showed that investigations of that kind might have only theoretical importance and did not reveal any specific meaning for practice as statistical methods required performing of numerous tests in different points of the subsurface area which would bring to unreasonably high financial cost.

A modification of the deterministic approach, new for hydrogeological practice and recognized in specialized references as aquifer sedimentology (Huggenberger and Aigner, 1999) has recently shown its advantages. This sedimentological approach comprises a set of direct and indirect "in situ" and laboratory sedimentological, stratigraphic and geophysical methods, which allow the direct determination of lithofacial and architectural-element units of different rank and scale (size). Each of those units is characterized with relative homogeneity of hydrogeological characteristics. The approach allows compilation of a good and rather precise 3D model, showing the natural heterogeneity of medium by a limited number of laboratory and field hydrogeological tests. Reliability of prediction model depends much on precise correlation between hydraulic and migration characteristics and existing 3D variation. However, cost efficiency and other practical concerns usually limit the number of exploratory and hydrogeological tests, which reduces the precision of simulation. This fact may not decrease the importance of suggested approach as the ratio of (financial cost)/(precision of prediction) may be optimized for each specific object depending on its significance. In some cases, below suggested dependence of correlation between hydraulic conductivity and size of grains of prevailing fraction and rate of sorting may be used purposefully for preliminary assessments and predictions.

SEDIMENTOLOGY OF WATER-BEARING STRUCTURES

As it has already been mentioned, the sedimentological approach has been successfully applied to hydrogeological issues. Often, especially when located in fluvial deposits, aquifers reveal a wide spectrum of lithological and lithofacial variability, which significantly predestinates the hydraulic and migration properties of medium. Recently many attempts to characterize and systematize qualitatively and quantitatively those heterogeneity by the form of a hierarchic system have been done (for example van de Graaff and Ealey, 1989; Dreyer, 1993). According to Huggenberger and Aigner (1999), within such hierarchic scheme of the degree of the lithological heterogeneity, the individual subdivisions could be treated as both genetic sedimentologic units and hydrogeologic units, for example:

- Giga-scale lithological heterogeneity, determined by development of sedimentary basin. It controls the confinements and inner structure of entire water-bearing basins;
- Mega-scale lithological heterogeneity, determined by the type of sedimentary environment. It characterizes the area interrelations of aquifers and complexes in the water-bearing basins;

- Macro-scale lithological heterogeneity, determined by local facial dynamics of sedimentary accumulation. It determines the morphology and inner structure of individual aquifers and aquitards;
- Meso-scale structural and textural variations, related to sedimentary dynamics. It subdivides aquifers into zones of different hydrogeologic characteristics;
- Micro-scale differences in petrology, porosity and permeability, related provenance and diagenesis. They control the processes of filtration and mass-transport at a micro level (in the pore channels).

The architectural-element analysis is among the main tools for implementation of macro- and mezo-scale investigations in sedimentology of aquifers, located in fluvial sequences. The method is based on the comprehension that fluvial sedimentary sequences are composed of eight constructive units, nominated as "architectural elements" (Allen, 1983; Miall, 1985, 1988). Their identification and characterization is possible in large two- and three-dimensional outcrops. The definition of these architectural elements is based on both their outer morphology, determined by the character of their confining surfaces, and organization of their inner structure. Those features reveal the different style and dynamics of sedimentary body generation and in most cases are related to morphologic features of dimensions of the complex sedimentary macroforms. Despite of some variations in their characteristic, it is accepted that most fluvial depositions are composed of those eight elements in different proportions.

The architectural element description and definition comprise:

- Nature and morphology of confining surfaces;
- Unit scale: thickness, lateral (parallel and perpendicular to the direction of the sedimentation paleotransport) development;
- Outer unit geometry;
- Inner structure of the unit: lateral and vertical lithofacial assemblages and sequences, presence and orientation of low-rank erosion surfaces, orientation of the indicators of the sedimentary paleotransport, interaction of bedding in respect of the limiting surfaces.

The application of architectural-element analyses to the study of fluvial sequences simplifies significantly their sedimentological modeling thus increasing precision and sustainability of prediction mathematical model.

COMPREHENSIVE APPROACH FOR SIMULATION OF 3D MEDIUM IN THE MATHEMATICAL MODEL OF GROUNDWATER CONTAMINATION IN THE AREA OF PLOVDIV SANITARY LANDFILL

The sanitary landfill of Plovdiv is developed in Quaternary and partially Neogene loose, mainly alluvial sediments. The uppermost part of the sedimentary section in and around the landfill is represented of four fluvial cycles, located one above

the other. The thickness of the separate cycles is within the range of 8-13 m showing lateral variations. Only the uppermost of these cycles outcrop on the surface, however, due to the character of sediments its exposure is rather limited. That is the reason, instead of the standard approach for architectural-element analysis, in a larger part of the area the acquiring of the necessary for the analysis data to be reduced to:

- Studying the vertical lithofacial sequences;
- Systematic measuring of all types of indicators in the direction of sedimentary paleotransport;
- Detailed study of morphology and orientation of limiting surfaces of individual lithofacial units.

As a result 10 lithofacial varieties and 6 types architectural elements are identified and characterized. The description of architectural elements in the present study is based on the proposed by Miall (1996) scheme with some changes and additions.

Groups of carefully correlated outcrops, located in a cross and longitudinal direction of dominating paleotransport trends are studied for achieving of correct model of the fluvial depositions. The acquired data have been used for interpreting the results of numerous exploratory boreholes in the area. A network of profiles, which illustrate the area distribution of separate fluvial cycles and comprise the entire territory of the landfill, is developed. Within each fluvial cycle the spatial interrelations of constructing architectural-elementary units are illustrated.

Based on numerous grain-size analyses, the degree of sorting of the sediments in each separate lithofacial unit is determined, and hence – in the architectural-elementary units that they compose. The representation and analysis of grain size data in standard phi-scale allows hydraulic and genetic interpretation of the studied sedimentary bodies.

A correlation diagram (Fig. 1) is compiled on the base of the relations between granular characteristics and rate of sorting of sediments, on one hand and hydraulic conductivity on the other, which many authors have obtained, (according to Виссмен, и др., 1979; Де Уист, 1969; Daly, 1982; Davis and DeWiest, 1966; Morris and Johnson, 1967, etc). It allows interpreting of lithofacial and architectural-elementary units as hydrogeological units (aquifers and zones of particular geometry and characteristics). At first approximation, two aquifers and one aquiclude are determined in the subsurface area of the Plovdiv sanitary landfill area. Zones of different penetration are differentiated in the aquifers, and a number of interruptions, so called hydrogeological windows, are localized in the clayey aquiclude.

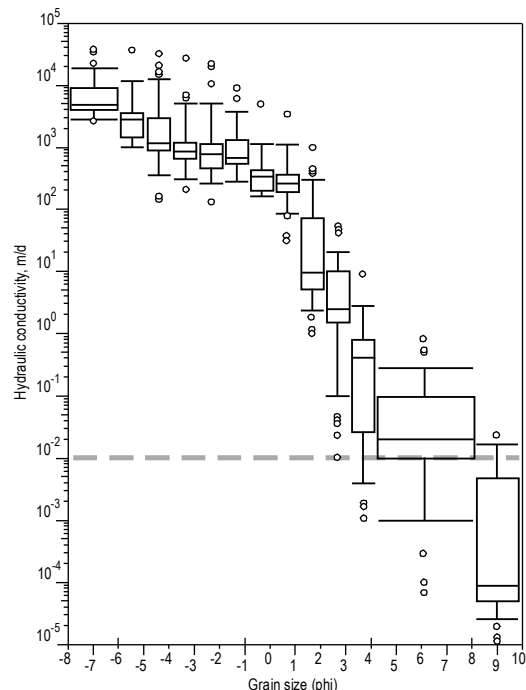


Figure 1. Correlation box-diagram of the type of sediments and hydraulic conductivity. Dotted line shows the boundary between permeable and practically impermeable sediments. Circles show the values, typical for well-sorted and poorly sorted varieties.

Each layer and zone acquires values of characterizing hydraulic and migration parameters based on data from laboratory and "in situ" filtration and traser tests. Thus, a rather precise 3-D model of subsurface area in the region of Plovdiv sanitary landfill is compiled. This model is successfully applied by the authors for precise simulation of aquifers and zones (potential medium for distribution of contaminants) in the filtration field for compilation of mathematical models for prediction of processes of groundwater contamination in the landfill.

REFERENCES

- Боревский, Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин, Л.С., 1973. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. - Недрa, Москва, 1973, 304 с.
- Виссмен, У., Хорбаф, Т.И., Кнэпп, Д.У., 1979. Введение в гидрологию. - Гидрометеиздат, Ленинград.
- Де Уист, Р., 1969. Гидрогеология с основами гидрогеологии суши. - МИР, Москва, с. 311.
- Мироненко, В.А., Шестаков, В.М., 1978. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. - Недрa, Москва, 1978, 325 с.
- Allen, J.R.L., 1983. Studies in Fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders. - Sediment. Geol., 33: 237-293.
- Andersen, P.F., 1993. A manual of instructional problems for the U.S.G.S. MODFLOW MODEL, Dynamac contract 68-C8-0058 with the U.S. Environmental Protection Agency, R.S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK 74820.
- Bear, J., 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. - Elsevier,

- New York.
- Bear, J., 1979. *Hydraulics of Groundwater*. - McGraw-Hill, New York.
- Dagan, G., 1989. *Flow and Transport in Porous Formations*. - Springer, Berlin.
- Daly, C., 1982. Evaluation of procedures for determining selected aquifer parameters. Prepared for U.S. Army Toxic Hazardous Materials Agency, CR REL Report 82-41.
- Davis, S., and J.M DeWiest, 1966. *Hydrogeology*. New York: Wiley, P. 463
- Dreyer, T., 1993. Geometry and facies of large-scale flow-units in fluvial dominated fan-delta front sequence. - *Advances in reservoir geology*. Geol. Soc. London, Spec. Publ. 69: 135-174.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. - Printice-Hall Inc., Englewood Clifs, New York, 604 pp.
- Gelhar, L. W., 1993. *Stochastic Subsurface Hydrology*. - Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York.
- Huggenberger, P., T. Aigner, 1999. Introduction to the special issue on aquifer-sedimentology: problems, perspectives and modern approaches. – *Sed. Geol.*, 129: 179-186.
- McDonald, J.M. and A.W. Harbaugh. 1988. A modular three-dimensional finite-difference flow model. - *Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey*, Book 6. 586 pp.
- Miall, A.D., 1985. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. - *Earth-Science Reviews*, 22: 261-308
- Miall, A.D., 1988. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: Anatomy of the Kayenta formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado. - *Sedimentary Geology*, 55: 233-262
- Miall, A.D. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology*. - Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 582
- Morris, D.A., and A.I. Johnson, 1967. Summary of hydrological and physical properties of rock and soil materials as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey. USGS Water Supply Paper 1839-D.
- van de Graaff, W. J. E., P. J. Ealey, 1989. Geological modeling for simulation studies. – *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 73: 1436-1444
- Wheatcraft, S. W., Tylor, S. W., 1988. An explanation of scaledependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry. - *Water Resour. Res.* 24, 566-578.
- Zheng, C. 1990. A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reaction of contaminants in groundwater systems, Prepared for the U.S. Environmental Protection Agency, R.S. Kerr Environmental Research Laboratory Ada, OK 74820.

Recommended for publication by Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Faculty of Geology