

УДК 622.02:539.2/.8

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКРАТНО ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА

Дрибан В. А., Дуброва Н. А.
(УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

Побудована дифузійно-дісперсійна модель розподілу забруднюючих речовин у багатократно підробленому масиві гірських порід, яка адекватно описує реальні геомеханічні процеси. Шляхом розв'язання оберненої задачі розсіювання, були одержані коефіцієнти фільтрації багатократно підробленого масиву гірських порід у Центральному районі Донбасу.

Diffusion-dispersion model for distribution of pollutants in repeatedly undermined rocks is constructed that satisfactorily describes real geomechanical processes. By solving inverse dispersion problem filtration factors for repeatedly undermined rocks in the Central area of Donbass were obtained.

В ранее опубликованных авторами работах [1-3] установлено, что тектонические нарушения разбивают массив горных пород на крупные блоки, экранирующие распространение поллютантов, либо наоборот, задающие направление пространственного распределения загрязнителей. Для выявления пространственных закономерностей характера распределения различных ВЗВ внутри тектонических блоков предложен следующий методический подход интерпретации исходных данных о распределении ВЗВ и построения безразмерной модели, позволяющей оценить общие характеристики процесса распределения загрязнителей в массиве. Суть данного методического подхода заключается в следующем: полученные статические поэлементные модели были нарезаны горизонтальными и вертикальными сечениями с интер-

валом 100-200 м. Затем, на каждый горизонтальный и вертикальный срез статистической модели были вынесены основные направления координатной сетки. Координатная сетка в каждом конкретном случае ориентирована таким образом (рис. 1), чтобы точка пересечения координатных осей находилась в центре "окружности", характеризующей максимальные концентрации загрязнителя на данной глубине (для горизонтальных сечений) и на данном направлении (для вертикальных). Часть моделей была нарезана в направлении простирания основных тектонических структур, задающих направление простирания ореолов загрязнения ВЗВ [4] и формирующих краевые условия распределения.

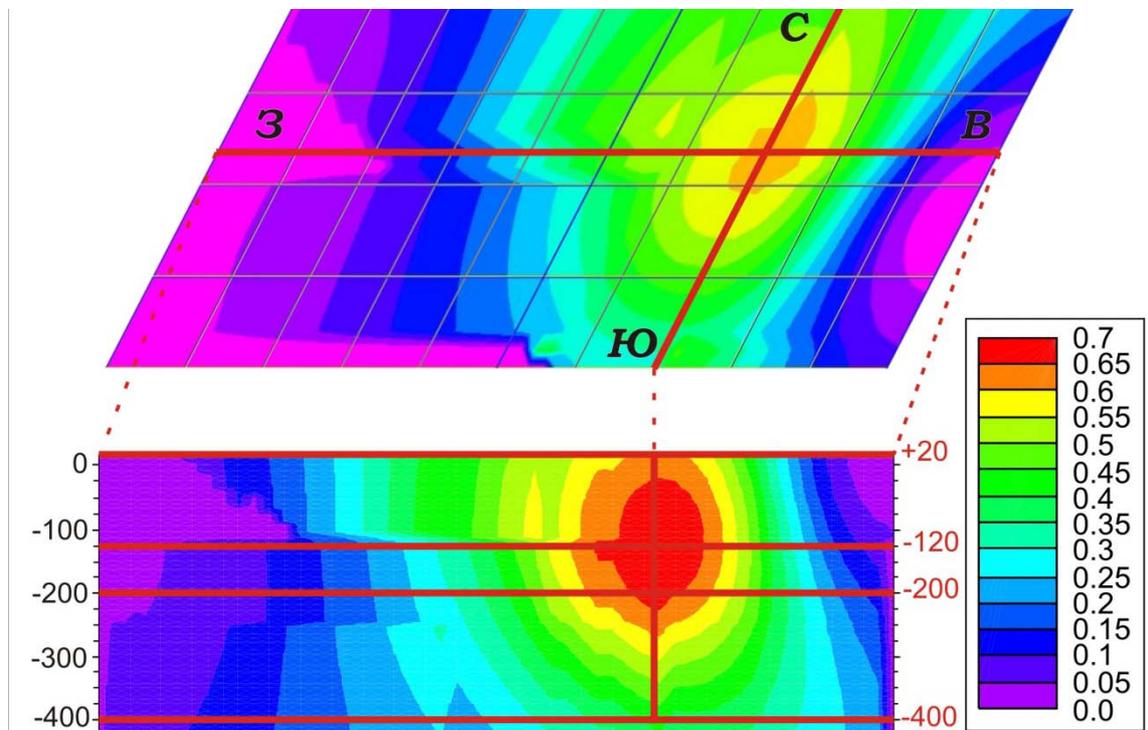


Рис. 1. Горизонтальное и вертикальное сечение модели (загрязнитель О-ксилол)

Использование средств моделирования RockWorks2002 позволило визуализировать тело загрязнения в объеме массива горных пород и интерполировать значение концентрации загрязнителя в любой точке массива независимо от пространственного расположения места отбора проб. Благодаря этому, на определенных ранее направлениях горизонтальных и вертикальных се-

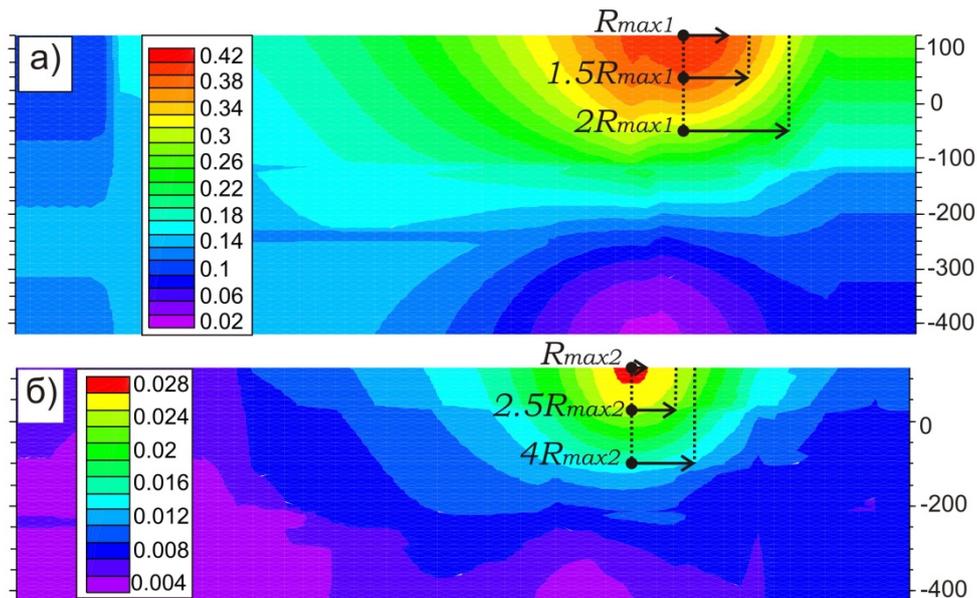
чений, были выделены численные значения концентраций ВЗВ. Данные значения отбирались через равный интервал, соответствующий шагу изолиний, отображающих концентрации соответствующего загрязнителя (например, для О-ксилола шаг равен 0,05 – см. рис. 1) с пространственной привязкой данной точки относительно центра очага максимальных концентраций для конкретного среза модели. Отобранные значения концентраций исследуемых загрязнителей были нормированы относительно максимального значения, встретившегося именно на конкретном срезе [4, 5].

В качестве пространственного показателя распределения ВЗВ использован параметр, характеризующий удаленность точки с известной концентрацией загрязнителя от центра очага загрязнения (от пространственного положения максимального значения) в единицах, приведенных к размеру радиуса очага максимально обнаруженной концентрации загрязнителя на данном конкретном срезе.

Затем, все расстояния, характеризующие удаленность точки с фиксированной концентрацией загрязнителя от центра очага максимальной его концентрации были приведены к значению R_{max} для каждого конкретного среза, то есть нормированы относительно размеров очага максимальных концентраций. Графическое пояснение предложенной методики приведено на рисунке 2.

На основании полученных данных были построены графики зависимости нормированных концентраций поллютантов от пространственной составляющей их обнаружения, приведенной к размеру очага максимальных концентраций для каждого рассматриваемого среза модели. Таким образом, мы получили безразмерную модель распределения ВЗВ, позволяющую оценить общие характеристики процесса распространения.

Всего было построено около пятидесяти графиков по четырем основным загрязнителям (О-ксилол, бутилацетат, стирол, моноэтилфосфат), с числом горизонтальных и вертикальных сечений от 2-х до 4-х.



а) бутилацетат; б) стирол

Рис. 2. Графическое пояснение использованной методики

Так для О-ксилола срезы модели выполнены на горизонтах +20, -100, -200 и -400 м в четырех основных направлениях света (С, Ю, З, В); для бутилацетата на горизонтах +120, 0 и -400 м в направлениях С, З, В; для стирола на горизонтах +120, 0 м в направлениях С, З, В; для моноэтилфосфата на горизонтах +200 и +100 м в направлениях С, Ю, З, В. Полученные для каждого загрязнителя зависимости были разнонаправленно сгруппированы, т.е. рассмотрены совместно как в плоских сечениях (на одном горизонте во всех направлениях – рис. 3), так и в вертикальных (в одном направлении на разных горизонтах – рис. 4).

В работах [6-9] был разработан и реализован инкрементальный подход для временной оценки трансформаций полей напряжений, деформаций и проницаемости массива горных пород в процессе подработки, который является базисом для оценки изменения фильтрационных характеристик массива горных пород условиях многократной систематической долговременной подработки массивов. Было установлено, что долгосрочная многократная подработка угольных пластов в условиях крутого падения приводит к образованию в массиве горных пород чередующихся пространственно-сопряженных зон сжатий и растяжений, заме-

щаючих друг друга в процесі ведення горних робіт і генеруючих квазірегулярну сеть вертикально орієнтованих техногенних колекторів, які представляють собою області підвищеної проникності, виниклі в результаті впливу предельних і заpredельних горизонтальних деформацій розтягнення, і являються міграційними коридорами, сприяючими проникновению поллютантів на більш глибокі горизонти.

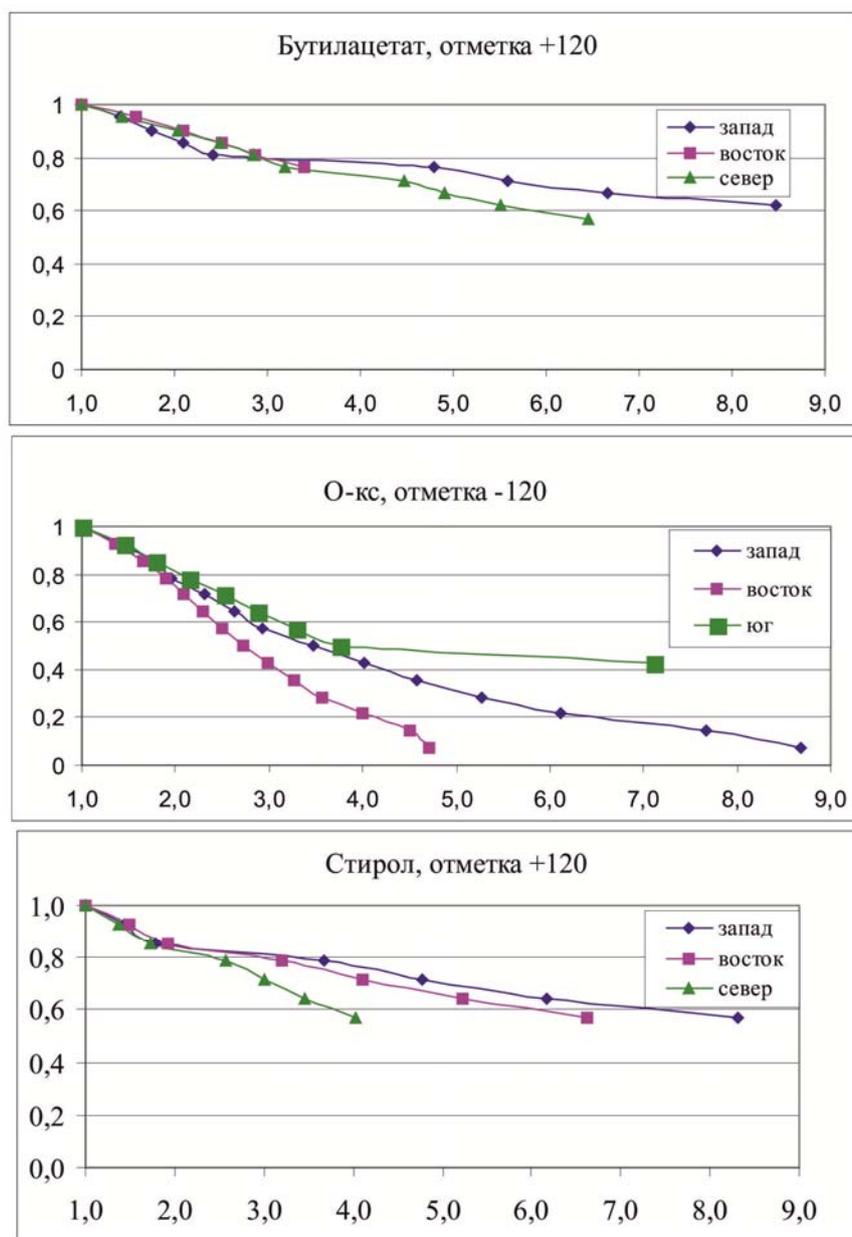


Рис. 3. Графики распределения ВЗВ по плоским сечениям

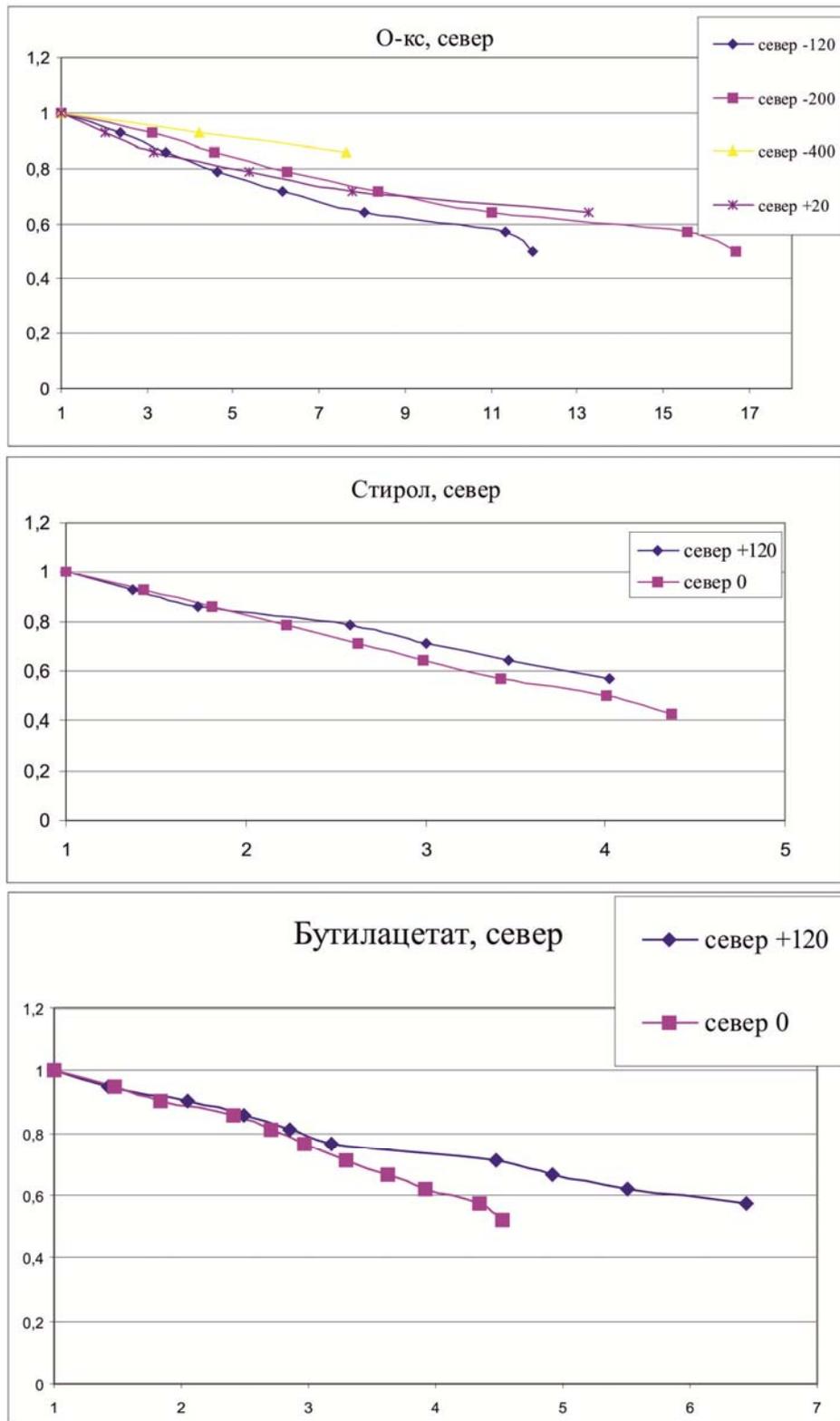


Рис. 4. Графики однонаправленных погоризонтных распределений ВЗВ

Данное обстоятельство позволило сформулировать гипотезу, о том, что указанные трансформации преобразовали массив горных пород в квазиоднородную по фильтрационным характеристикам среду. Для подтверждения адекватности полученной оценки изменения фильтрационных характеристик вмещающих пород и выдвинутой гипотезы, представляется возможным использовать экспериментальные данные о распределении в массиве вредных загрязняющих веществ (ВЗВ), как наиболее представительные, полные и удовлетворяющие задаче исследования.

В качестве примера, иллюстрирующего интенсивность техногенной нагрузки на исследуемом участке приведен рисунок 5 [5], где на разрезе вкрест простирания горных пород совместно визуализированы зоны влияния аппроксимированных контуров горных работ и очаг загрязнения массива ацетоном.

Согласно [10], в сравнительно однородных породах, гомогенных (квазигомогенных) по фильтрационным свойствам, миграция описывается в рамках моделей микродисперсии: предполагается, что все механизмы процесса идут на одном микроуровне, отвечающем репрезентативному элементу гомогенной пористой или трещиноватой среды. Для трещиноватых пород это предполагает:

- 1) пренебрежимо малое влияние пористости породной матрицы;
- 2) рассмотрение объемов массива, удовлетворяющих условию сплошности среды;
- 3) синхронность заполнения веществом трещин разного порядка в пределах физической точки репрезентативного минимального объема среды.

В работе [10] отмечено, что для крупноблочных трещиноватых пород или пород с каналовым механизмом миграции последние два условия выполнимы лишь для больших пространственно-временных масштабов, до достижения которых такие породы должны рассматриваться как гетерогенная среда.

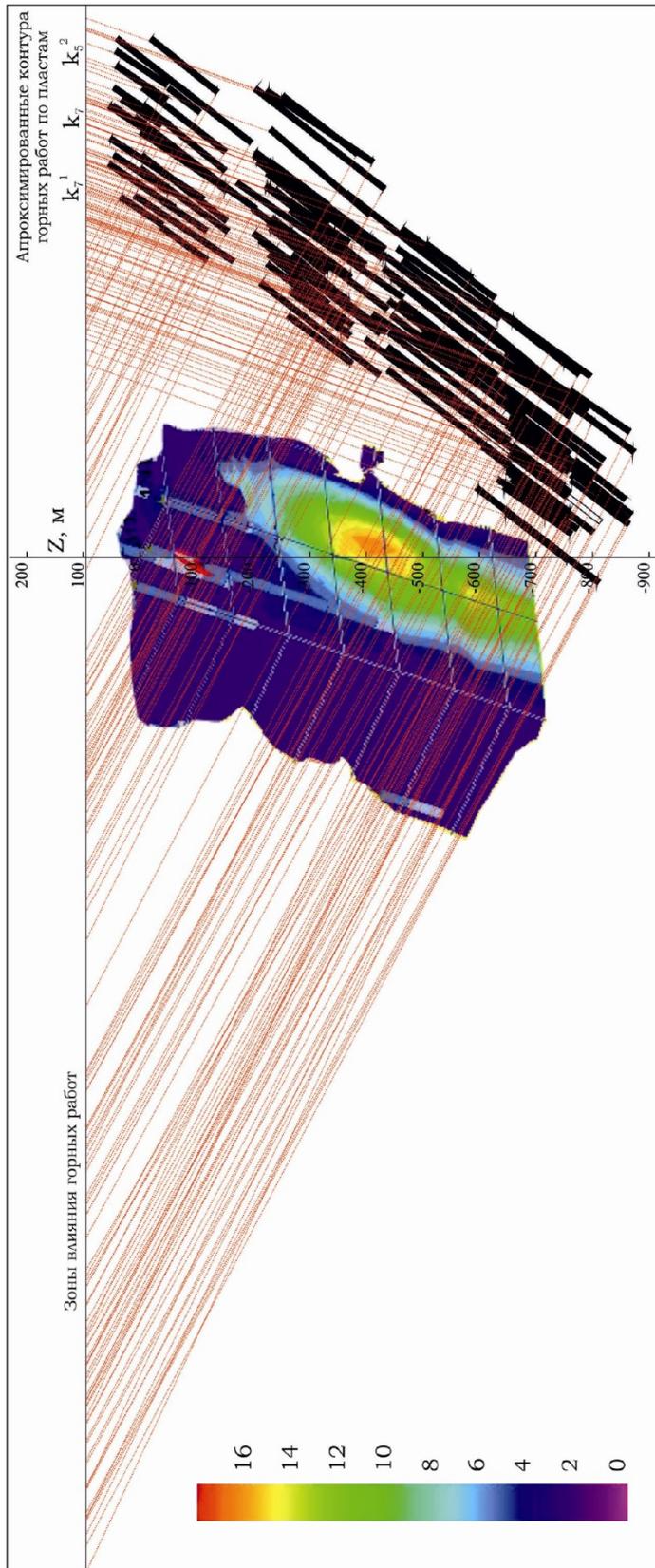


Рис. 5. Разрез вкрест простирания горных пород с визуализацией зон влияния аппроксимированных контуров горных работ и очага загрязнения ацетоном

Заметим, что описанные в [10] принципы, в рамках решаемой нами задачи практически выполнены, что дает нам возможность построения аналитической модели распространения ВЗВ в первом приближении. Таким образом, задачу можно формализовать следующим образом.

Требуется определить поле распределения концентраций ВЗВ в плоскости при наличии постоянно действующего во времени источника загрязнений интенсивностью 1, занимающего некоторую область Ω .

В общем случае диффузионно-дисперсионный перенос описывается уравнением, базирующимся на феноменологическом законе Фика [11-14]:

$$n \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla J + W_s = 0, \quad (1)$$

где функция $J(c)$ отвечает массовому потоку (статистически осредненному в пределах минимальных репрезентативных объемов пористой или трещиноватой среды);

W_s – объемная интенсивность поглощения-выделения, обусловленная проявлением внутренней гетерогенности пород (двойная пористость, регулярная слоистость и т.п.) или физико-химическими взаимодействиями.

Вид функционала $\nabla J(c)$ вообще говоря, зависит от мерности процесса. В общем трехмерном случае в декартовой системе координат описывается формулой:

$$\nabla J = \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i c) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right), \quad (2)$$

где D_{ij} – компоненты тензора микродисперсии, зависящие от рассеивающих свойств среды.

Высказанные выше соображения о трансформации многократно подработанного массива в квазигомогенную среду позволяют существенно упростить выражения (1, 2). В безразмерных координатах указанные формулы принимают вид:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \frac{\partial \Phi}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где τ - обобщённый параметр увязывающий время протекания процесса, диффузионно-фильтрационные характеристики массива и геометрические параметры области источника.

На основании частного решения уравнения диффузии (фильтрации, теплопроводности) поле распределений нормированных концентраций поллютанта можно записать в следующем виде:

$$\Phi(\vec{r}_0, t) = \int_0^t \iint_{\Omega} \tau^{-1} e^{-\frac{|\vec{r}-\vec{r}_0|^2}{4k\tau}} d\Omega d\tau, \quad (4)$$

где r_0 – радиус-вектор данной точки плоскости сечения.

Анализ фактических распределений загрязнителей (рис. 1, 2) позволяет, по крайней мере, в первом приближении аппроксимировать область максимальных концентраций в виде круга радиуса R . В этом случае выражение (4) упрощается и принимает приемлемый для счета и анализа одномерный вид:

$$\Phi(r_0, t) = \int_0^t \int_0^{2\pi} \int_0^1 r \tau^{-1} e^{-\frac{|r-r_0|^2}{4k\tau}} dr d\theta d\tau, \quad (5)$$

где r, θ - полярные координаты.

На рисунке 6 представлены типовые кривые распределения концентраций для различных значений обобщенного параметра в зависимости от относительного (приведенного к радиусу области максимальных концентраций) расстояния.

Итак, построена теоретическая модель, описывающая поля распределения поллютантов. Следующим необходимым шагом является верификация указанной модели по экспериментальным данным. Для этого были проанализированы функции невязки типовых распределений и фактических данных:

$$f(\tau) = \sum_i (\Phi(x_i, \tau) - yf_i)^2, \quad (6)$$

где uf_i – фактические относительные концентрации;
 x_i – относительные расстояния до центра пятна загрязнения;
 τ – обобщенный параметр, определяемый по формуле
 $\tau = 4ktR^{-2}$.

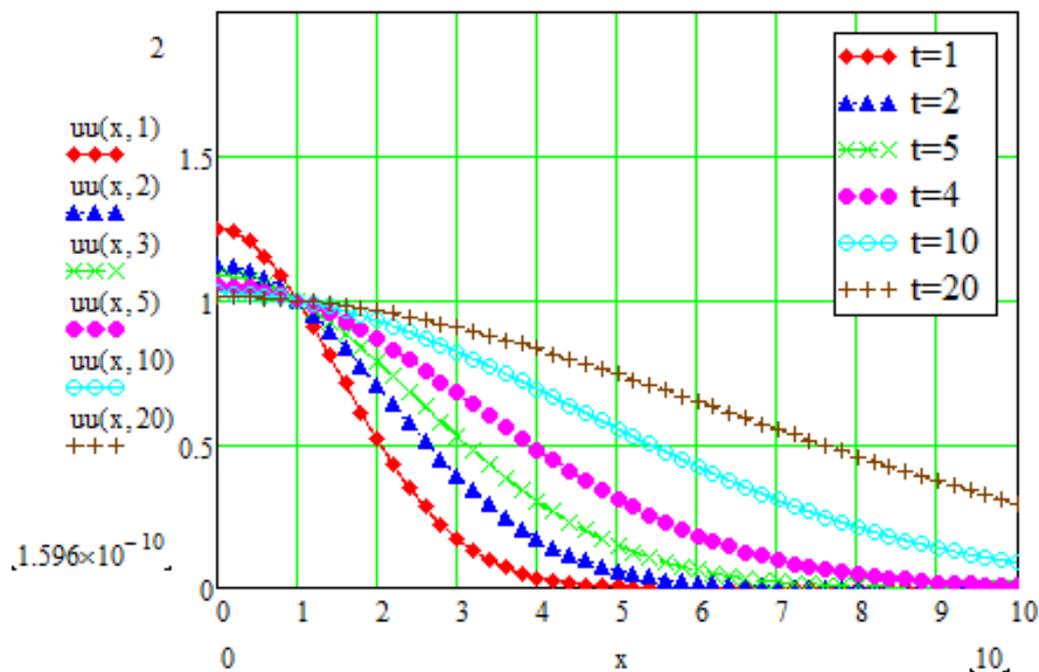


Рис. 6. Типовые кривые распределения концентраций для различных значений обобщенного параметра в зависимости от относительного расстояния

В связи с тем, что достоверно не известно время начала утечек ВЗВ из поверхностных источников загрязнения, расчет производился для временного интервала длительностью десять лет.

На рисунке 7 представлена кривая невязки для О-ксилола направление восток-запад гор. минус 120 м.

Очевидно, что минимум указанной функции соответствует наилучшему приближению теоретических кривых к экспериментальным данным. Заметим, что высокие корреляционные отношения свидетельствуют о хорошем приближении построенной теоретической модели протекающим геомеханическим процессам.

В соответствии с данными принципами, были произведены перерасчеты и построены планиметрические модели распространения ВЗВ, а также решена обратная задача: по данным имитаци-

онного моделювання знайдені параметри дифузійно-дисперсійного процесу розподілу поллютантів, описуючі параметри вказаного процесу, протікаючого в масиві.

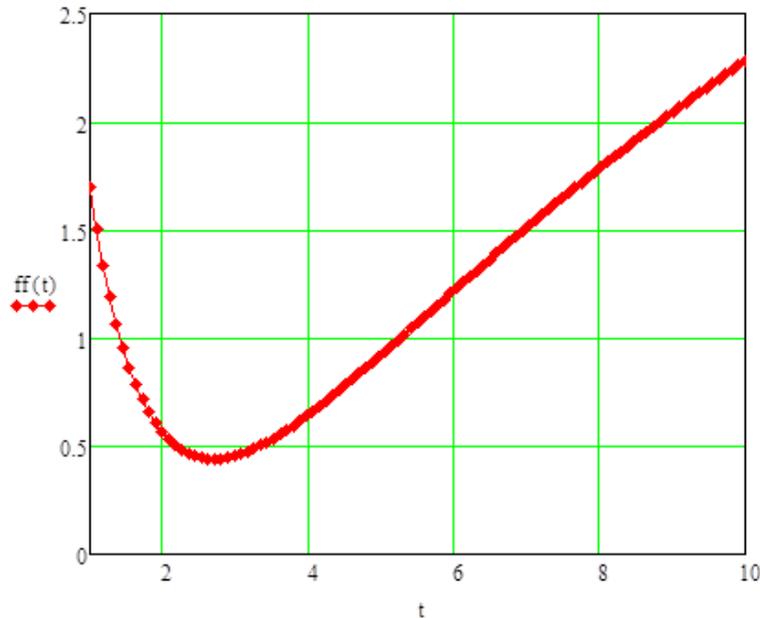


Рис. 7. Кривая невязки для О-ксилола (направление восток-запад, горизонт минус 120 м)

Так как мы рассматриваем процесс квазистационарного состояния, при котором утечки носят постоянный во времени долгосрочный характер, то параметр времени t , не вносит принципиальных ошибок в полученные результаты, что связано с временной структурой решения уравнения диффузии. Также заметим, что источник загрязнения не является точечным, а представляет собой некую локализованную область.

Следует отметить, что перерасчет выполнялся совместно для сопряженных направлений (восток-запад, север-юг), однако в связи со спецификой исходных данных, некоторые направления рассмотрены одиночно.

Таким образом, в соответствии с вышеизложенными принципами, были произведены перерасчеты и построены планиметрические модели погоризонтного распределения для каждого загрязняющего вещества. Примеры полученных моделей представлены на рисунках 8-10.

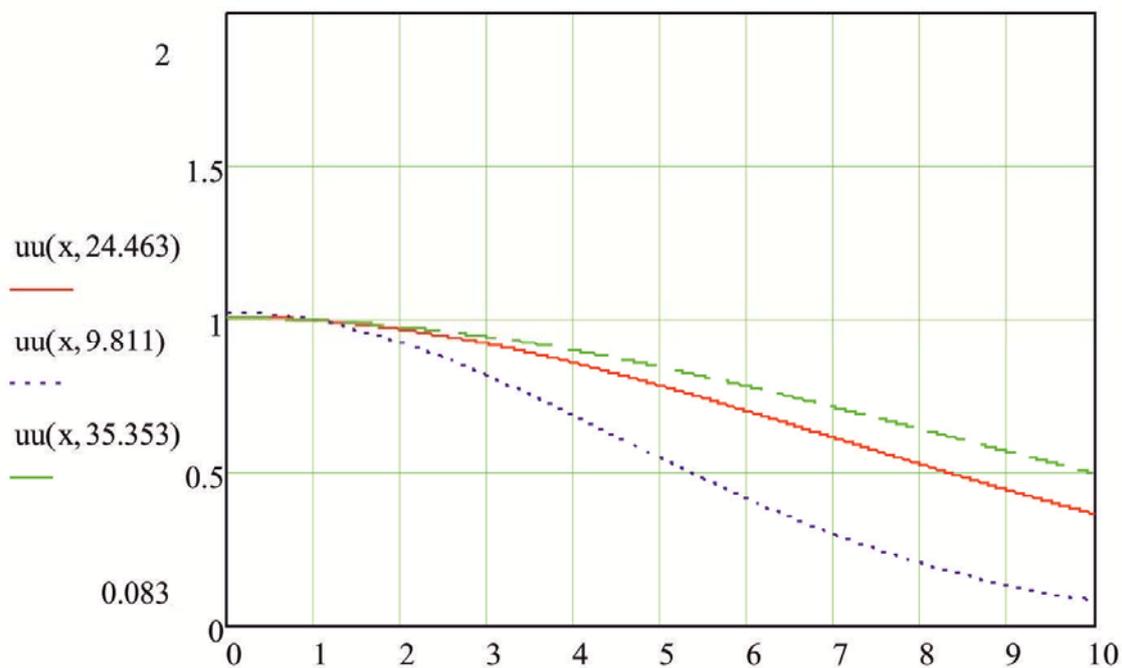


Рис. 8. Планиметрическая модель распределения моноэтилфосфата на горизонте +100 м

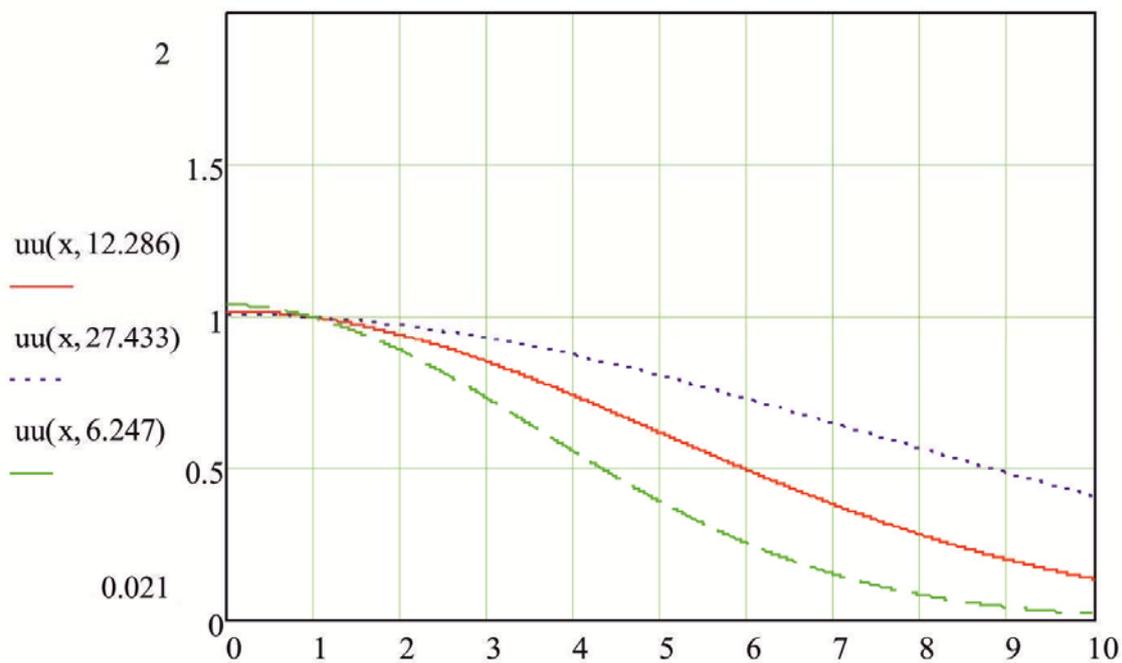


Рис. 9. Планиметрическая модель распределения О-ксилола на горизонте -120 м

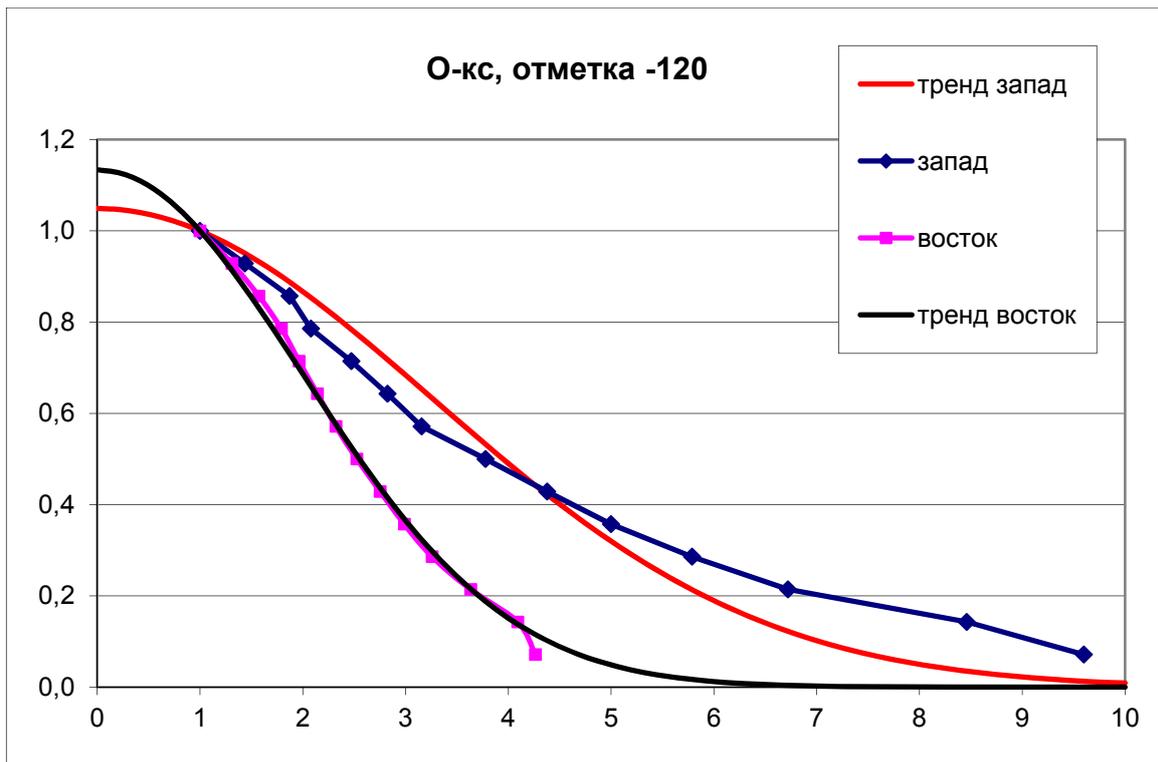


Рис. 10. Типовые кривые распределения концентраций О-ксилола на горизонте минус 120 м, направление запад, восток

Сводные данные о полученных результатах погоризонтного и поэлементного диффузионно-дисперсионного распределения приведены в таблице 1.

Полученные результаты (см. табл. 1) показывают высокие корреляционные соотношения (от 0,68 до 0,9 и выше), что свидетельствует о том, что выбранная модель верна.

Необходимо отметить, что полученные результаты не только подтверждают факт того, что массив квазиоднороден, но и весьма проницаем. А поскольку вода является главным «распространителем, носителем, переносчиком» поллютантов в массиве, то появляется возможность отождествить диффузионно-дисперсионные коэффициенты с коэффициентами фильтрации и проницаемости.

Выводы.

1. Построена диффузионно-дисперсионная модель распределения ВЗВ адекватно описывающая реальные геомеханические процессы в многократно проработанном массиве горных пород.

Таблица 1

Параметры погоризонтного диффузионно-дисперсионного
 распределения поллютантов

ВЗВ, горизонт, направление	Радиус пятна с максимальной концентрацией, м	Количество данных	Значение при кото- ром достигается минимум невязки	Коэффициент диффузии (фильтрации)	Корреляционное отношение	Среднеквадратич- ное отклонение
О-к.с., З -120	122	14	5	$6,132 \times 10^{-5}$	0,976	$3,916 \times 10^{-3}$
О-к.с., В -120	122	14	1	$2,219 \times 10^{-5}$	0,999	$1,751 \times 10^{-4}$
О-к.с., Ю -120	94	8	4	$3,027 \times 10^{-5}$	0,993	$3,719 \times 10^{-4}$
О-к.с., С -120	94	6	28	$1,992 \times 10^{-4}$	0,937	$1,825 \times 10^{-3}$
О-к.с., В-3 -200	50	27	17	$3,473 \times 10^{-5}$	0,910	0,013
О-к.с., Ю -200	51	8	13	$2,821 \times 10^{-5}$	0,998	$8,868 \times 10^{-5}$
О-к.с., С -200	51	8	133	$2,78 \times 10^{-4}$	0,881	$5,990 \times 10^{-3}$
О-к.с., В-3 -400	15	12	1550	$2,99 \times 10^{-4}$	0,820	$6,913 \times 10^{-3}$
О-к.с., Ю -400	88	6	13	$8,323 \times 10^{-5}$	0,997	$9,168 \times 10^{-5}$
О-к.с., С -400	88	4	94	$5,906 \times 10^{-4}$	0,982	$2,243 \times 10^{-4}$
О-к.с., В +20	246	10	8	$4,278 \times 10^{-4}$	0,983	$1,436 \times 10^{-3}$
О-к.с., З +20	246	10	42	$2,021 \times 10^{-3}$	0,993	$6,037 \times 10^{-4}$
О-к.с., Ю +20	271	5	18	$1,107 \times 10^{-3}$	0,985	$3,124 \times 10^{-4}$
О-к.с., С +20	271	5	54	$3,165 \times 10^{-3}$	0,845	$2,921 \times 10^{-3}$
Бут.-ац., З-В 0	104	16	23	$2,031 \times 10^{-4}$	0,684	0,01
Бут.-ац., С 0	83	11	7	$4,028 \times 10^{-5}$	0,998	$9,331 \times 10^{-5}$
Бут.-ац., ЗВ-400	54	10	80	$1,879 \times 10^{-4}$	0,834	$2,217 \times 10^{-3}$
Бут.-ац., ЗВ+120	352	10	6	$6,247 \times 10^{-4}$	0,897	$9,982 \times 10^{-4}$
Бут.-ац., С +120	250	10	14	$7,17 \times 10^{-4}$	0,928	$2,610 \times 10^{-3}$
Стирол, З 0	69	10	60	$2,265 \times 10^{-4}$	0,743	0,019
Стирол, В 0	69	9	13	$4,907 \times 10^{-5}$	0,729	0,016
Стирол, С 0	87	10	4	$2,904 \times 10^{-5}$	0,831	0,013
Стирол, В +120	367	7	12	$1,318 \times 10^{-3}$	0,905	$3,697 \times 10^{-3}$
Стирол, З +120	367	7	27	$2,942 \times 10^{-3}$	0,840	$6,005 \times 10^{-3}$
Стирол, С +120	298	7	6	$4,427 \times 10^{-4}$	0,975	$9,879 \times 10^{-4}$
МЕР, З +100	174	6	24	$5,936 \times 10^{-4}$	0,711	$5,646 \times 10^{-3}$
МЕР, В +100	174	6	9	$2,381 \times 10^{-4}$	0,959	$9,161 \times 10^{-4}$
МЕР, С-Ю +100	70	6	35	$1,403 \times 10^{-4}$	0,917	$5,688 \times 10^{-4}$
МЕР, З-В +200	111	12	146	$1,441 \times 10^{-3}$	0,795	$5,939 \times 10^{-3}$
МЕР, С-Ю +200	162	12	56	$1,176 \times 10^{-3}$	0,685	$6,563 \times 10^{-3}$

2. Путем решения обратной задачи рассеяния, были получены коэффициенты фильтрации многократно подработанного массива горных пород.

3. Предложена методика обработки данных результатов фактических наблюдений о распределении ВЗВ в массиве, позволяющая привести тело рассеяния ВЗВ к безразмерному виду и по относительно малому объему фактических данных восстанавливать фильтрационные параметры массива, то есть решать прямую и обратную задачу распределения поллютантов.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Дуброва Н. А. Влияние тектонических структур на ореолы рассеяния загрязняющих веществ в подработанном массиве горных пород / Дуброва Н. А., Дьяченко Н. А. // Наукові праці УкрНДМІ: зб. наук. праць. – Донецьк, УкрНДМІ НАН України. – 2011. – №9. – С. 485 – 501.
2. Дуброва Н. А. Распространение вредных загрязняющих веществ в подработанном массиве горных пород со сложной тектонической нарушенностью (на примере ЦРД) / Н. А. Дуброва // Форум гірників – 2012: матеріали міжнар. конф., м. Дніпропетровськ.– Д.: Національний гірничий університет,– 2012. – Т. 1.– С. 166-172.
3. Дуброва Н. А. Закономерности распределения вредных загрязняющих веществ в сложнорушенном массиве горных пород (на примере ЦРД) / Н. А. Дуброва // Проблеми гірничої технології: зб. матеріалів регіональної науково-практичної конференції., Красноармійськ. – 2012. – С. 310- 317.
4. Дрибан В. А. Изучение количественных и пространственных параметров распределения вредных загрязняющих веществ в техногенно нарушенном массиве горных пород сложного строения / Дрибан В. А., Дуброва Н. А. // Наукові праці УкрНДМІ: зб. наук. праць. – Донецьк, УкрНДМІ НАН України. – 2011. – № 11. – С. 306-318.
5. Дуброва Н. А. Оценка изменения фильтрационных свойств деформируемого массива в результате многократной подработки / Н. А. Дуброва // Вісник КрНУ. – Кременчук: КДПУ, 2014. – Вип. 1/2014 (84). – С. 96-105.

6. Дрибан В. А. Особенности деформирования массивов горных пород ЦРД при многократной долгосрочной подработке / Дрибан В. А., Грищенко Н. Н., Дуброва Н. А. // Форум гірників – 2013: матеріали міжнар. конф., м. Дніпропетровськ.– Д.: Національний гірничий університет,– 2013. – Т. 2. – С. 226-232.
7. Дрибан В. А. Особенности формирования техногенных коллекторов при отработке угольных пластов в условиях ЦРД / Дрибан В. А., Грищенко Н. Н., Ходырев Е. Д., Дуброва Н. А. // Наукові праці УкрНДМІ: зб. наук. праць. – Донецьк, УкрНДМІ НАН України. – 2011. – №13 (I). – С. 220-237.
8. Driban V., Dubrova N. Evaluation of changes in rock mass permeability due to long-time repeated mining // PROGRESSIVE TECHNOLOGIES OF COAL, COALBED METHANE, AND ORES MINING. – CRC Press/Balkema, Netherlands, 2014. – pp. 167-174.
9. Driban, V. Measurement of change of rock mass permeability in consequence of long-time repeated mining / V. Driban, N. Dubrova // Матеріали науково-практичної конференції посвященої 80-літтю стахановського руху. Луганський державний університет ім. Володимира Даля, – Луганськ, 2015. – С.72-78.
10. Мироненко В. А. Проблемы гидрогеоэкологии. Т. 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов / В. А. Мироненко, В. Г. Румынин . – М.: Изд. Московского государственного горного университета, 1998. – 611 с.
11. Бочеввер Ф. М. Защита подземных вод от загрязнения / Бочеввер Ф. М., Лапшин Н. Н, Орадовская А. Е. – М.: Недра, 1979. – 245 с.
12. Лукнер Л. Моделирование миграции подземных вод / Лукнер Л., Шестаков В. М. – М.: Недра. – 1986.
13. Bear J. Dynamics of fluids in porous media. Amer. Els. N. Y., 1972. – 764 p.
14. Шестаков В. М. Динамика подземных вод / В. М. Шестаков – М.: изд. МГУ, 1979. – 368 с.