

Российская академия наук
Уральское отделение
Горный институт
Министерство общего и профессионального
образования Российской Федерации
Пермский государственный технический университет

В.И. Галкин, В.В. Середин, Б.А. Бачурин

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
УГЛЕВОДОРОДОВ В ГРУНТАХ И ВЫБОРЕ
ТЕХНОЛОГИЙ ИХ САНАЦИИ**

Пермь 1999

УДК 504.06

Применение вероятностно-статистических моделей при изучении распределения углеводородов в грунтах и выборе технологий их санации /В.И. Галкин, В.В. Середин; Б.А. Бачурин; Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1999. 140 с.

Рассмотрены вероятностно-статистические методы, применяемые для оценки критериев выбора возможных и оптимальных технологий санации нефтезагрязненных территорий. На основе экспериментальных данных построены математические модели.

Работа рассчитана на специалистов в области охраны окружающей среды, научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов экологических специальностей вузов.

Табл. 27. Ил. 56. Библиогр.: 21 назв.

Рекомендовано к изданию Ученым советом Горного института УрО РАН

Рецензент: д-р геол.-мин. наук, проф. С.А. Шихов
(Пермский государственный технический университет)

ООО "Недра"
БИБЛИОТЕКА

ISBN 5-88151-209-X

© В.И. Галкин, В.В. Середин,
Б.А. Бачурин, 1999

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДОВ ПО ПЛОЩАДИ И РАЗРЕЗУ	6
1.1. Краткая характеристика территории исследования.....	6
1.2. Методика исследований.....	10
1.3. Изучение распространения углеводородов по площади и разрезу территории исследований.....	19
1.4. Прогнозирование загрязнения почвогрунтов углеводородами	48
2. ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ САНАЦИИ.....	50
2.1. Методика работ	50
2.2. Изучение особенностей распределения углеводородов в процессе санации	59
2.3. Построение вероятностно-статистических моделей санации	73
2.4. Оценка и выбор эффективных методов санации	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	138

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, проведенные И. Мазуром [15], показывают, что потери нефти в результате аварийных проливов на поверхности рельефа и воды составляют около 3% от годовой добычи нефти, что составляет около 9 млн. т. В. Аренс [1] оценивает потери нефти в размере 25 млн.т/год. С. Островский [17], ссылаясь на данные Международного социально-экологического союза, считает, что потери нефти составляют около 4,5 млн.т/год.

Из вышесказанного следует, что проблема санации нефтезагрязненных территорий стоит достаточно остро. Для решения этой проблемы необходимо, с одной стороны, разрабатывать и внедрять эффективные технологии санации, с другой – изучать особенности распределения углеводородов в почвогрунтах, оценивать природно-техногенные условия санации и прогнозировать нефтезагрязнения.

В работе [19] приводится методика принятия управленческих решений по санации нефтезагрязненных территорий. В общей методической схеме важное место занимают два структурных элемента:

1. Определение возможных технологий санации, т.е. таких способов очистки, которые применимы в конкретных условиях.

2. Выбор из всех возможных технологий санации таких способов, которые являются оптимальными.

И на том, и на другом этапе необходимо, во-первых, определить обоснованные критерии выбора и, во-вторых, иметь методику качественной и/или количественной оценки этих критериев. Для решения этой задачи в ряде случаев целесообразно применять вероятностно-статистические методы.

В работе [19] обоснованы и приведены критерии, определяющие возможность применения тех или иных способов санации нефтезагрязненных территорий. К этим критериям относятся:

- вязкость углеводородов;
- сорбционная способность почвогрунтов;
- температура почвогрунтов;
- степень загрязнения почвогрунтов углеводородами.

Отсюда видно, что показатель, характеризующий степень загрязнения почвогрунтов, является одним из самых существенных при определении возможности очистки. Прямое определение этого показателя в реальных условиях является трудоемким и дорогостоящим. Поэтому важной представляется задача прогноза степени загрязнения по легко определяемым показателям или по косвенным данным, полученным для других целей, например, по геологическим особенностям строения территорий исследований.

Первая часть данной работы посвящена решению этой задачи с помощью построения вероятностно-статистических моделей распределения углеводородов по площади и разрезу и прогнозирования этих распределений. Эффективность использования вероятностно-статистических моделей для решения аналогичных задач показана в работах [2-5, 7-14, 16, 20, 21].

После определения возможных методов санации общая методологическая схема предполагает необходимость выбора оптимальных способов. Под оптимальностью здесь понимается простота технологии, невысокая их стоимость, скорость снижения содержания УВ в почвогрунтах во времени. То есть основными критериями выбора оптимальных способов санации являются:

- стоимость санации;
- время санации;
- содержание УВ в почвогрунтах;
- глубина нулевых концентраций УВ.

Критерий стоимости санации в экономическом аспекте выходит за рамки проводимых исследований. Сама по себе задача количественной оценки этого критерия достаточно актуальна и, возможно, будет в будущем решена. Оценка критерия стоимости с точки зрения энергетических затрат приведена в работе [19].

Остальные критерии выбора рациональных способов санации обосновываются в данной работе. Для этого были изучены и статистически обработаны значительные объемы экспериментальных данных, полученных при проведении очистных работ. На основе детального анализа этих данных построены вероятностно-статистические модели для прогноза указанных критериев в целях выбора оптимальных методов санации.

Анализу статистических данных, построению математических моделей и выбору оптимальных технологий санации посвящена вторая часть данной работы.

1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДОВ ПО ПЛОЩАДИ И РАЗРЕЗУ

1.1. Краткая характеристика территории исследования

1.1.1. Краткий физико-географический очерк

Участок исследований находится в черте г. Перми на территории АО «Нефтехимик», в юго-восточной части промплощадки АО «ЛУКойл-ПНОС».

Рельеф участка характеризуется наличием выровненных поверхностей и склонов, образовавшихся в результате плоскостного смыва, глубинной и боковой эрозией р. Камы, ее притоков и временных водотоков.

В геоморфологическом отношении в пределах участка выделяются:

- склон IV левобережной надпойменной террасы р. Камы (правый борт долины р. Пыж);
 - III надпойменная терраса р. Камы, осложненная долиной р. Пыж.
- По доминирующем склоноформирующим процессам, большая часть склона IV надпойменной террасы относится к делювиальному, а юго-западная, обращенная к долине р. Пыж и являющаяся ее правобережным бортом, представляет эрозионный склон.

1.1.2. Климат

Климат района умеренно-континентальный. Зимой воздействие отрока Сибирского антициклона вызывает сильные морозы, а приток теплых воздушных масс Атлантики вызывает потепление и даже оттепели. Летом территория находится в основном в области низкого давления.

Среднегодовая температура воздуха $+1,7^{\circ}\text{C}$. Максимальная амплитуда колебаний температуры воздуха составляет 84°C – от наивысшего значения $+37^{\circ}\text{C}$ летом до наименьшего -47°C зимой. Среднемесячная температура самого холодного месяца $-14,1^{\circ}\text{C}$, самого теплого $+18,8^{\circ}\text{C}$.

Средние даты перехода среднесуточных температур через 0°C – 23 марта и 9 ноября. Средняя продолжительность безморозного периода 115 дней (наименьшая – 93 дня, наибольшая – 143 дня). Средняя дата первого заморозка осенью – 8 сентября, последнего весной – 2 июня.

Среднегодовое количество осадков составляет 596 mm^1 , из них на теплый период (месяцы IV-X) приходится 385 mm , на холодный (месяцы XI-III) – 211 mm .

¹ По СНиП 2.01.01-82, среднегодовой слой осадков для г. Перми составляет 697 mm .

Средняя дата появления снежного покрова 16 октября, устойчивого покрова – 4 ноября. Средняя дата разрушения устойчивого снежного покрова – 18 апреля. Полнотью снег сходит в среднем 26 апреля. Число дней со снежным покровом – 174. Средняя высота снежного покрова за зиму – 55 см, максимальная – 75 см, минимальная – 35 см.

1.1.3. Гидрологические условия

Гидрологические условия участка определяются рядом факторов: геоструктурными особенностями территории, геолого-литологическим строением, геоморфологическим строением, техногенной нагрузкой. Взаимодействие этих факторов создает многообразие гидрологической обстановки на различных участках.

По материалам изысканий установлено наличие подземных вод, приуроченных:

- а) к терригенным породам шешминского горизонта уфимского яруса верхней перми (шешминский водоносный комплекс);
- б) к элювиально-делювиальным четвертичным глинистым отложениям (подземные воды спорадического распространения);
- в) к аллювиальным четвертичным отложениям.

A. Шешминский водоносный горизонт.

Наиболее сложное литолого-фацальное строение имеют шешминские отложения. Водоносными являются песчаники, водоупорными – прослои аргиллитов и алевролитов. Водопритоки из аргиллитов и алевролитов, как правило, связаны не с водоносностью этих пород, а с перетоком вод по трещинам из вышележащих песчаников.

В результате чередования в разрезе водопроницаемых пород образуется система этажно расположенных водоносных прослоев и горизонтов со сложной гидравлической связью.

В отложениях шешминского горизонта, залегающих выше вреза долины р. Пыж, выделены подземные воды трещинно-грунтового типа, безнапорные и слабонапорные. В отложениях, залегающих ниже вреза, распространены напорные подземные воды трещинно-пластового типа.

Первый водоносный горизонт трещинно-грунтовых вод залегает на глубинах 1,6 – 14,8 м (абс. отм. 110,08 – 119,33 м). На участке, приуроченном к делювиальному склону (скв. 25, 26, 1к), установившиеся уровни подземных вод фиксируются на глубинах 5,4 – 9,2 м (абс. отм. 110,4 – 117,6 м). В районе куполообразной возвышенности, осложняющей делювиальный склон (скв. 14, 15), глубина залегания подземных вод увеличивается до 12,7 – 14,8 м (абс. отм. 113,6 – 113,7 м).

На участке крутого обнаженного эрозионного склона скважинами, пройденными в верхней части (скв. 4, 11, 12, 13), установившиеся уровни подземных вод зафиксированы на глубинах 3,9 – 7,1 м (абс. отм. 118,1 – 118,9 м); в средней части (скв. 3, 5, 8) – на глубинах 2,4 – 3,6 м (абс. отм.

113,7 – 115,3 м). Отмечается «этажность» водоносных пластов, при бурении скважин фиксируются как местные напоры, достигающие 4 м (скв. 3, 14, 15, 24), так и перетоки из верхних слоев в нижние (скв. 1а, 24а).

Область питания трещинно-грунтовых вод совпадает с площадью их распространения. Основной источник питания подземных вод – атмосферные осадки, дополнительный – утечки из водонесущих коммуникаций. Оба источника загрязнены нефтепродуктами, о чем свидетельствует высокое их содержание в пробах воды, достигающее 195 – 330 мг/л.

Уровень трещинно-грунтовых вод подвержен сезонным колебаниям с годовой амплитудой порядка 1,5 – 2,0 м. Сравнение уровней подземных вод в пределах площади, зафиксированных зимой 1974 – 1975 гг. и в октябрь – декабре 1995 г., показало повышение отметок меженных уровней за прошедшие 20 лет на 2 – 3 м.

Трещинно-грунтовые воды, распространенные в пределах исследованной площади, образуют грунтовый поток, направленный от делювиального склона IV надпойменной террасы к III надпойменной террасе р. Камы в общем направлении на запад. Долина р. Пыж дренирует часть грунтового потока. Частичная разгрузка трещинно-грунтовых вод происходит из-за нисходящих родников в пределах эрозионного склона, а также из-за перетока вод в четвертичные элювиально-делювиальные отложения в нижней части склона и в русловом аллювии р. Пыж.

Кроме разгрузки в эрозионную сеть, происходит и скрытая разгрузка трещинно-грунтовых вод путем перетока в нижележащие шешминские отложения. Поэтому значительная разгрузка трещинно-грунтовых вод происходит в отложения III надпойменной террасы р. Камы за пределами исследованной площади, в левом борту долины р. Пыж.

Водообильность верхней части шешминских отложений незначительна и неравномерна. По результатам откачки из скв. 2, дебит составил 5,2 м³/сут, удельный дебит – 0,84 м³/сут. Коэффициент фильтрации шешминских пород в зависимости от литологического состава изменяется от 0,02 м/сут (аргиллит) до 0,68 м/сут (песчаник).

Второй водоносный горизонт шешминских отложений – трещинно-пластовые воды приурочен к хорошо выдержанному по площади слою песчаников серовато-зеленоватых слабосцементированных, трещиноватых. В зависимости от геоморфологического положения участка этот слой песчаников прослеживается скважинами на глубинах от 4,5 – 6,0 м (абс. отм. 105,5 – 108,7 м) в долине р. Пыж до 16,5 – 17,7 м (абс. отм. 103,3 – 108,5 м) в пределах делювиального склона. Слой песчаников залегает ниже эрозионного вреза р. Пыж, и подземные воды, приуроченные к нему, обладают напором. В пойме р. Пыж пьезометрический уровень трещинно-пластовых вод наблюдался на уровне подземных вод аллювиальных четвертичных отложений, их напор на подошве покровных аллювиальных суглинков составляет 2–8 м.

В то же время в скв. 1к, пройденной в верхней части делювиального склона (абс. отм. поверхности 126,8 м), наблюдаемый пьезометрический уровень трещинно-пластовых вод в феврале–марте 1996 г. отмечен на абсолютных отметках 116,48 - на 1,12 м ниже зафиксированного статического уровня трещинно-грунтовых вод. После вскрытия трещинно-пластовых вод в скв. 1к наблюдался переток вниз трещинно-грунтовых вод.

Как показали проведенные опытно-фильтрационные работы, трещинно-грунтовые и трещинно-пластовые воды гидравлически взаимосвязаны, об этом свидетельствует понижение уровней трещинно-грунтовых вод (скв. 2к и 3к) при откачке из трещинно-пластовых вод (скв. 1к), а также переток из трещинно-грунтовых вод в скв. 1к.

Основная область питания трещинно-пластовых вод находится за пределами исследованной площади, дополнительное питание они получают за счет перетока из вышележащего горизонта трещинно-грунтовых вод.

По результатам откачки из скв. 1к, дебит составил $26 \text{ м}^3/\text{сут}$, уровень воды понизился на 1,06 м, коэффициент фильтрации песчаников (с глубины 17,7 м, абс. отм. 109,1 м) $14,6 \text{ м}/\text{сут}$, коэффициент пьезопроводности $1,2 \times 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$. По результатам геофизических исследований в скв. 1к, в интервале глубин 11,0–12,5 м коэффициент фильтрации составил $14,4 \text{ м}/\text{сут}$.

Третий водоносный горизонт вскрыт скв. 28 на глубине 28,0 м (абс. отм. 84,5 м), мощность горизонта 9,0 м, приурочен к песчаникам трещиноватым, горизонт напорный, скорость фильтрации составляет $2,0 \text{ м}/\text{сут}$.

Б. Подземные воды элювиально-делювиальных четвертичных отложений.

Подземные воды элювиально-делювиальных четвертичных отложений в пределах исследованной площади имеют спорадическое распространение и встречены на отдельных участках в нижней части склона, где терригенные шешминские породы переходят глинистыми элювиально-делювиальными отложениями. Водовмещающие отложения – суглинки и супеси, мощность не превышает 4,0 м. Установившиеся уровни подземных вод зафиксированы на глубине от 0,0 м (абс. отм. 111,5 – 112,80 м) в районе скв. 2в, ба до 0,8–2,6 м по скв. 7,9.

По данным экспресс-откачки из скв. ба, коэффициент фильтрации супеси составил $0,39 \text{ м}/\text{сут}$.

Питание подземных вод элювиально-делювиальных четвертичных отложений осуществляется за счет частичной разгрузки в них трещинно-грунтовых вод. Разгрузка происходит в пойму р. Пыж.

В. Подземные воды аллювиальных четвертичных отложений.

Подземные воды аллювиальных четвертичных отложений встречены в юго-восточной части исследованной площади, в заболоченной пойме р. Пыж, приурочены к аллювиальным серым текучепластичным и текучим суглинкам. Мощность водовмещающей толщи от 2,0 до 4,9 м. Установив-

шийся уровень подземных вод в феврале 1994 г. зафиксирован на глубине 0,3–1,5 м (абс. отм. 110,95 – 112,90 м).

В северной части поймы вода стоит на поверхности слоем 0,2–0,9 м.

Питание подземных вод аллювиальных отложений осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, речных вод и разгрузки подземных вод элювиально-делювиальных четвертичных отложений и трещинно-грунтовых вод со склонов.

1.1.4. Особенности геологического строения

Всего на территории исследований опробовано более 70 скважин, которыми вскрыты антропогенные и четвертичные отложения, а также породы шешминского горизонта, из которых для исследований отобрано более 320 проб.

Антропогенные отложения представлены в основном песками и щебенистым материалом. Мощность этих отложений изменяется от 0 до 1,3 м. Породы четвертичного возраста представлены суглинками, песками и дресвяно-щебенистым грунтом.

Суглинки тёмно-бурого цвета, от твёрдой до полутвёрдой консистенции, плотные, с включениями щебня аргиллита. Мощность суглинка изменяется от 0,8 до 3,7 м. Наибольшая мощность вскрыта скважинами 16, 17, 18, а наименьшая – скважинами 7, 8, 15.

Пески серого цвета, влажные, мелко- и среднезернистые, средней плотности. Пески имеют локальное распространение (скважины 7, 15, 17, 19). Максимальная вскрытая мощность достигает 1,7 м.

Дресвяно-щебенистый грунт представлен обломками аргиллита с суглинистым заполнителем до 20%. Он также имеет локальное распространение, максимальная мощность вскрыта скважиной 2 и составляет 1,3 м.

Породы шешминского возраста представлены песчаниками и алевролитами. Песчаники серого цвета, тонкозернистые, плотные, трещиноватые на глинисто-известковом цементе. Мощность песчаников изменяется от 0,5 до 3,8 м.

Алевролиты тёмно-вишнёвого цвета, средней крепости, трещиноватые, их мощность изменяется также в широких пределах – от 0 до 3,8 м.

1.2. Методика исследований

Изучение особенностей распределения загрязняющих веществ по разрезу и площади проводилось в следующей последовательности:

- изучалось геологическое строение территории;
- определялось количественное содержание нефтепродуктов в почвогрунтах;

- с помощью геологических и вероятностно-статистических методов устанавливались закономерности распределения УВ в грунтовом массиве.

Для определения содержания УВ в почвогрунтах были проведены полевые исследования, включающие в себя бурение скважин, отбор монолитов, изучение кернового материала, гидрогеологических, геоморфологических и других условий.

Для целей оптимизации разведочной сети использовались данные об изменчивости наименее выдержаных геолого-разведочных параметров (углеводородов) исследуемой территории.

В нашем случае до бурения скважин не было данных о распределении ароматических УВ по площади и разрезу территории АО «Нефтехимик», поэтому эти параметры определялись по следующей системе.

На первом этапе опробование производилось равномерно по площади, где находились источники возможного загрязнения (цех этилбензола – корпус 401; ёмкости с готовой продукцией – корпуса 404 и 405) и где, по данным опроса работников, были проливы органических соединений в грунте.

На втором этапе производилось уплотнение сети скважин. Максимальное их количество было пробурено на площадке цеха 31 химзавода. Схема размещения исследуемых скважин приведена на рис. 1.1.

Определение загрязняющих грунт веществ проводилось хроматографическим способом на хроматографе «Хром» с пламенно-ионизационным детектором по общепринятой методике.

Результаты анализов приведены в табл. 1.1, основные статистические характеристики – в табл. 1.2 .

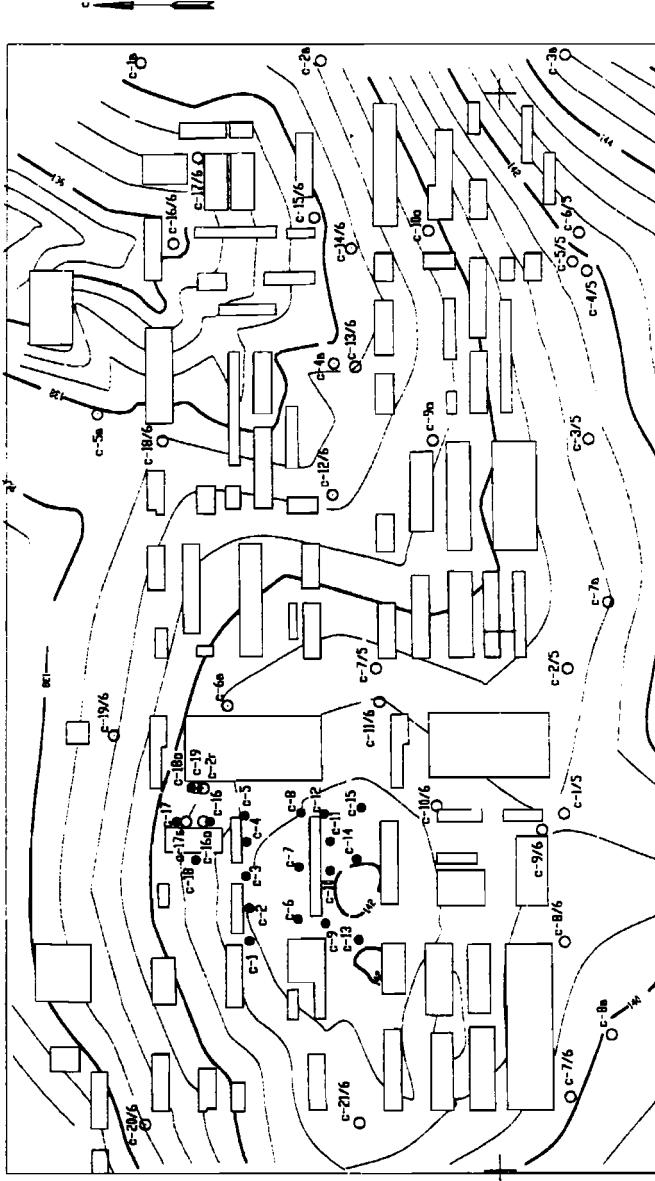


Рис. 1.1. Схема расположения геологических скважин

Установленные обозначения:

- c-15 - скважины 1988 г.,
- c-21 - скважины 1990 г.,
- k10 — изолинии рельефа, м

Габлика 1.1

Результаты хроматографического анализа проб грунта скважин на территории АО «Недрхимик»

Номер спр.	Глубина, м	Содержание УВ в пробах грунтов, мг/100г почвы										К= Σ УВ ПДК			
		бензол	толуол	этанол	м-п-ксилол	о-ксиол	стирол	к-масл. аль.	изобути- спирт	бути- спирт	2-этано- гексанон	суммарное содержание по специальным			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
9/6	0,1	1,23	0,31									1,54			
9/6	0,3	1,24	0,04									1,28			
9/6	0,5	1,24	0,04									1,41			
21/1	0,2	1,55	0,05									1,16			
21/1	0,5	1,27	0,05									1,32			
1/5	0,2	1,31	0,08									1,39			
1/5	0,3	1,35	0,05									1,40			
1/5	0,5-0,6	1,28	0,18									1,46			
19/6	0,1	1,35	0,06									17,01			
19/6	0,3	1,15	0,04									14,88			
10/6	0,1	1,39	0,11									3,96			
10/6	0,5	1,37	0,05									9,73			
10/6	0,8	1,23											1,5		
2/5	0-0,11	1,25	0,06									1,42			
2/5	0,4-0,5	1,27	0,04									1,38			
2/5	0,7-0,8	0,65	0,04									5,67			
2/5	0,9	1,27	0,06									6,35			
7/6	0,3	1,4	0,05									4,24			
7/6	0,5	1,21	0,09									1,31			
12/6	0,3	1,34	0,07									6,36			
12/6	0,5	1,10											5,23		
11/6	0,4	1,36	0,06									14,03			
11/6	0,5	1,20											2,08		
11/6	0,8	0,68											6,04		
11/6	0,8	0,68											4,08		
17/3	0,1	0,59	0,039									5,04			
7/5	0,1	0,18	0,07									0,25			
20/6	0,3	0,62											0,62		
8/6	0,2	0,65											0,65		
8/6	0,2	0,65											0,65		

Продолжение табл. 1.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1,0	0,65		0,05	0,15	0,13							0,98			
1	2,0		0,03	0,004	0,005		0,007						0,046			
1	3,0			0,347	0,218								0,565			
1	4,0	0,947			0,102	0,113							1,162			
2	1,0	2,68			0,315	0,214							3,149			
2	2,0	1,33			0,153	0,22							1,726			
2	3,0	3,321			0,432	0,18							3,933			
2	4,0		0,22	0,07	0,06	0,036							0,406			
3	1,0	1,04	0,03	0,73	0,09	0,09							1,98			
3	2,0			1,116	0,118		0,038						1,388			
3	3,0				0,03	0,116		0,009					0,539			
3	5,0				0,225	0,124							1,064			
4	1,0				0,035	0,015							0,349			
4	2,0	0,445		0,032	0,045	0,027	0,121						0,05			
4	3,0					0,09	0,07						0,67			
5	1,0	0,055	0,035	0,98	0,845	0,026							0,16			
5	2,0	0,405	0,044		0,069	0,106		0,024					1,941			
5	3,0				0,08	0,086		0,006					0,648			
6	1,0				0,149	0,13							0,172			
6	2,0	0,44			0,11	0,12							0,279			
7	1,0	0,95			0,13	0,08							0,67			
7	2,0	0,508			0,119	0,199		0,04					1,16			
7	3,0				0,072	0,093		0,011					0,866			
7	4,0				0,358	0,177							0,176			
8	1,5	0,593			0,177	0,2							0,535			
8	2,5				0,17	0,17							0,97			
9	1,0						0,14	0,15					0,34			
9	2,0					0,176	0,151	0,03					1,64			
10	1,0						0,162	0,196		0,02			0,729			
10	2,0	0,43	0,91	0,027	0,09	0,027	0,01	0,01					1,185			
10	2,5	0,47				0,135	0,22		0,027				0,378			
11	1,0	0,358	0,05	2,39	0,009		0,072		0,02				0,577			
11	2,0				0,04		0,078		0,023				0,852			
11	2,8	0,645				0,109	0,078						2,807			
													0,132			
													0,855			
													1,265			

Продолжение табл. 1.1

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
12	1,0			0,621	0,372	0,2	0,17						1,363	0,43	0,788
12	2,0			0,19	0,09	0,09	0,06						0,571		
12	3,0			0,205	0,107	0,128	0,027						0,253		
13	1,0			0,06	0,036	0,08	0,06	0,017					1,27		
13	2,0					0,59	0,667	0,013					0,15	0,575	
13	3,0					0,02	0,07	0,06					0,625		
13	4,0			0,406		0,063	0,156								
14	1,0				0,066	0,12	0,024						0,21		
14	2,0				0,028	0,234	0,113						0,375		
14	3,0			0,40		0,90	0,12	0,02					1,44	0,276	
14	5,0			0,544		0,14	0,159	0,036					0,879		
15	1,0			0,553		0,166	0,188	0,029					0,936		
15	2,0			0,848		0,23	0,144	0,032					1,254		
15	3,0			0,866		0,13	0,151	0,032					1,179	0,914	
15	4,0					0,117	0,12						0,237		
15	5,0					0,9	0,06	0,006					0,966		
16	1,0				1,3	0,157	0,161	0,164					1,782		
16	2,0			0,646	0,785	0,19	0,182	0,039					1,842		
16	3,0			0,094	2,227	0,084	0,115	1,496					4,016	1,709	
16	4,0					0,066	0,093	0,017					0,176		
16	5,0			0,314	0,047	0,011	0,07	0,066	0,22				0,728		
17	1,0			0,527		0,194	0,139						0,86		
17	1,5			0,498		0,18	0,143	0,019					0,84		
17	2,0			3,672		0,288	0,384	0,36					4,704		
17	3,0			0,34	2,6	0,11	0,18	4,86					8,09		
17	4,0			0,462	1,151	0,039	0,27	0,087					1,009		
17	5,0				0,28	0,08	0,09	0,19					0,64		
18	1,0			3,09		0,29	0,17						1,55		
18	2,0					0,07	0,068						0,075	1,373	
18	3,5					0,31	0,184						0,494		

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
19	1,0	1,04			0,151	0,176	0,017						1,384		188
19	2,0	1,34			0,22	0,176	0,39						0,39		
19	2,5				0,13	0,11							1,58		
19	3,0				0,359	0,238	0,12	0,102					0,813		
19	3,5				1,008	0,254	0,147	0,098					1,582		
19	4,0				1,88	3,14		1,99					7,010	1,294	
19	4,5				2,39	1,22	0,97	1,58					5,287		
19	5,0				1,99	3,23	1,12	0,98	1,89				8,310		
15/6	0,1							6,55	7,41	11,7	5,85	31,51			780
15/6	0,7							5,15				5,15	18,33		
14/6	0,1							0,5	2,5				3,0	6,0	
14/6	0,5								2,42				67,47		
14/6	0,7							5,18				31,14	36,32	37,40	
6/5	0,15							19,36	4,2				23,56		
6/5	0,6								5,45				7,26	12,71	15,29
6/5	0,9							4,7	2,35				2,54	9,59	
3/5	0,1							0,79					0,79		
3/5	0,5												4,02	2,52	182
3/5	0,8												2,74		
3/6	0,1								2,74						
3/6	0,3												12,49		
3/6	0,6												11,20	69,76	
18/6	0,1												185,60		
18/6	0,3												30,66		1250
16/1	0,1												14,27	22,17	
16/6													10,96		
16/6													32,65	17,36	1580
5/5	0,1												8,46		
5/5	0,5												3,20		612
5/5	0,7												8,90	8,85	
													14,46		

Продолжение табл. 1.1

Окончание табл. 1.1

Таблица 1.2
Основные статистические характеристики изучаемых величин

Показатель	Среднее значение	Стандартное отклонение	Минимальное отклонение	Максимальное отклонение	Количество проб
Концентрация, мг/100 г почвы:					
бензола	1,01	0,70	0,01	3,67	59
толуола	0,18	0,43	0,01	1,99	57
этилбензола	0,74	0,97	0,01	3,23	27
м-параксилола	0,25	0,42	0,004	3,14	71
ортоксилола	0,15	0,12	0,005	0,84	70
стирола	0,45	1,22	0,006	6,00	43
изомасляного альдегида	10,21	11,16	0,40	44,80	16
изобутилового спирта	20,65	17,11	2,50	51,21	16
бутилового спирта	15,56	24,60	1,60	92,80	30
2-этилгексанола	39,77	74,37	2,00	172,57	5
2-этилгексаналя	34,56	72,19	1,90	244,00	11
Глубина отбора проб, м	2,32	1,99	0,1	9,0	170

1.3. Изучение распространения углеводородов по площади и разрезу территории исследований

Изучая данные, приведённые в табл. 1.1 и на схеме размещения скважин, рассмотрим особенности распределения отдельных компонентов УВ по разрезу и площади.

Бензол встречен в 31,7% всех исследованных проб. Карта распределения бензола приведена на рис. 1.2, по которой видно, что повышение концентраций бензола наблюдается в западной части площадки, максимальные концентрации отмечены в скв. 2. Необходимо отметить, что бензол обнаружен только в западной части, на востоке, в отобранных пробах его нет. На рис. 1.3 приведена гистограмма по бензолу, которая показывает, что распределение асимметрично, с модальным интервалом 1,0–1,5 мг/100 г почвы (мода равна 1,1 мг/100 г почвы). Концентрация бензола выше 2,5 мг/100 г почвы встречается редко. Установить какую-либо тенденцию в изменении концентраций бензола по разрезу отложений по имеющимся данным не представляется возможным. Корреляционная связь между ним и глубиной отбора составляет 0,18.

Метапараксилол. На рис. 1.4 видно, что метапараксилол на исследуемой территории в основном отсутствует, он (концентрация более 0,5 мг/100 г почвы) локализован в пределах северо-западной части участка. Максимальные концентрации наблюдаются в скважинах 5, 17, 19. Распределение данного соединения одномодальное (рис. 1.5). Выборка характер-

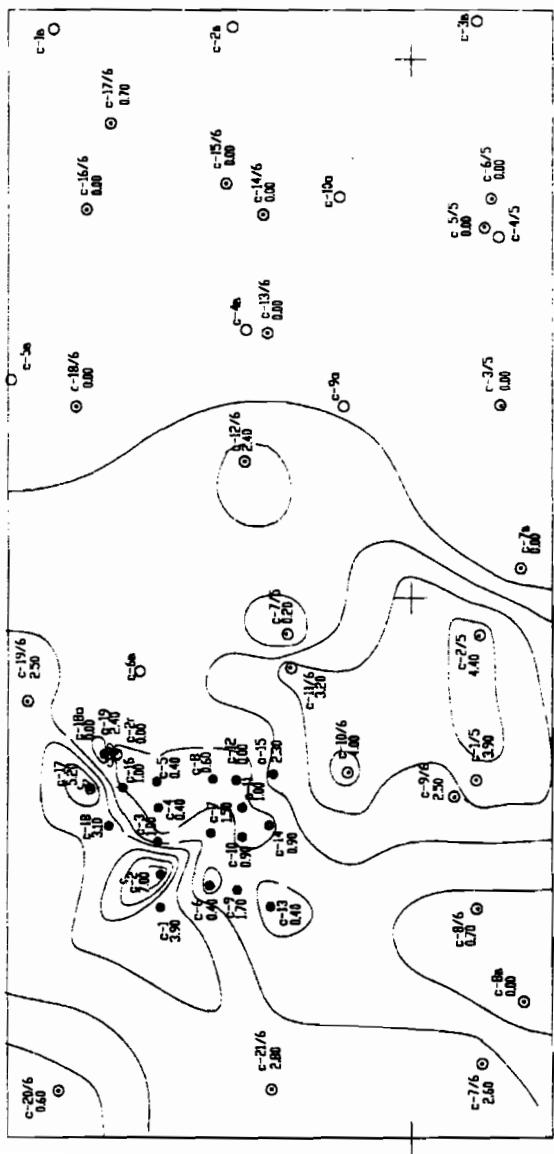


Рис. 1.2. Схема распределения бензола

Условные обозначения см. на рис. 1.1

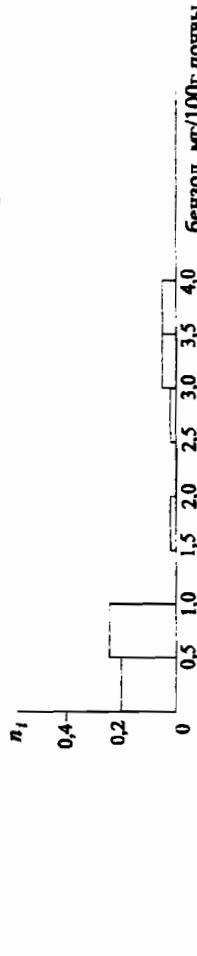


Рис. 1.3. Гистограмма по бензолу (n_i - частость)

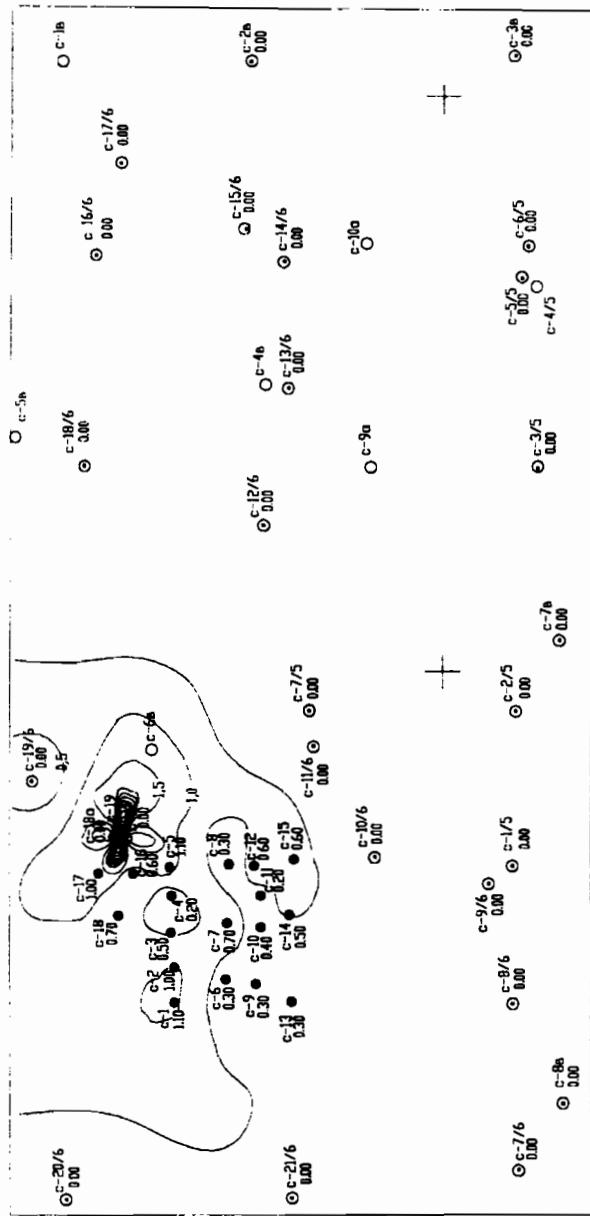


Рис. 1.4. Схема распределения метапараксилола

Условные обозначения см. на рис. 1.1

n_i

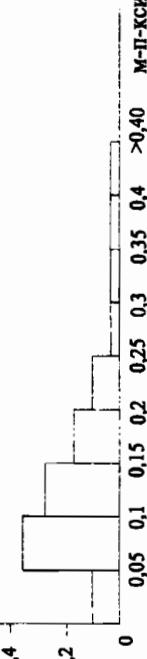


Рис. 1.5. Гистограмма по метапараксилолу (n_i , - частоты)

ризуется наличием значений во всех интервалах, с модальным интервалом 0,05–0,10 мг/100 г почвы (мода равна 0,086 мг/100 г почвы).

По разрезу выявить закономерности распределения метапараксилола не удалось. Установлено, что аномальные концентрации наблюдаются в скв. 19 в интервале глубин 4–5 м (3,14 мг/100 г почвы), данные пробы литологически представлены песками и песчаниками, т.е. характеризуются повышенными ёмкостными свойствами и, как следствие этого, максимальной возможностью накапливать УВ.

Ортоксилол. По построенной карте (рис. 1.6) видно, что повышенные концентрации (0,2 мг/100 г почвы) ортоксилола локализованы по площади так же, как бензола и метапараксилола. Эти концентрации зафиксированы в скв. 1, 5, 15, 17 и 19. Распределение ортоксилола практически нормальное в интервале концентраций 0–0,3 мг/100 г почвы (рис. 1.7).

Общей тенденции в распределении ортоксилола по разрезу грунтов не наблюдается. Необходимо отметить наличие высоких концентраций в скв. 5 на глубине 1 м, в скв. 17 на глубине 2,0 м и в скв. 3 на глубине 3,0 м.

Сопоставление концентраций метапараксилола и ортоксилола показало, что между ними имеется значительная корреляционная связь, но в пределах этой связи наблюдаются некоторые особенности. Для большинства проб связь между концентрациями линейная (под углом 45°), то есть их количество в пробах практически одинаково. Вторая особенность – связь между ними смещена из-за повышенных концентраций метапараксилола. В скв. 19 наблюдаются высокие концентрации метапараксилола и низкие – ортоксилола, причём высокие концентрации отмечены в пробах песка и песчаника.

Стирол. Распределение стирола по площади по сравнению с вышеописанными соединениями более локализованно (рис. 1.8). Он обнаружен только в 43 пробах (рис. 1.9). Высокие концентрации обнаружены в пробах скв. 16, 17, 19, в скв. 19 – на глубине от 4 до 5 м. В песчаниках количество стирола аномально, тогда как выше по разрезу концентрации его незначительны.

Этилбензол. На карте концентрации этилбензола (рис. 1.10) видно, что его распределение по площади аналогично бензолу. Гистограмма по этилбензолу приведена на рис. 1.11. В интервале 0–0,25 мг/100 г почвы находится максимальное количество проб, а в интервале 0,25–1,50 мг/100 г почвы частоты встречаемости концентраций практически одинаковы. Концентрации более 2,0 мг/100 г почвы выявлены с частотой встречаемости 0,19. Этилбензол встречен только в 26 пробах: в одной пробе – скв. 2, 3, 4, 5, 10, 11, в двух – скв. 13, в трех пробах – скв. 12, в четырех – скв. 16, 17, 19. Высокая концентрация наблюдается в скв. 19, 17, 16, 11. По разрезу выявить закономерности распределения не удалось.

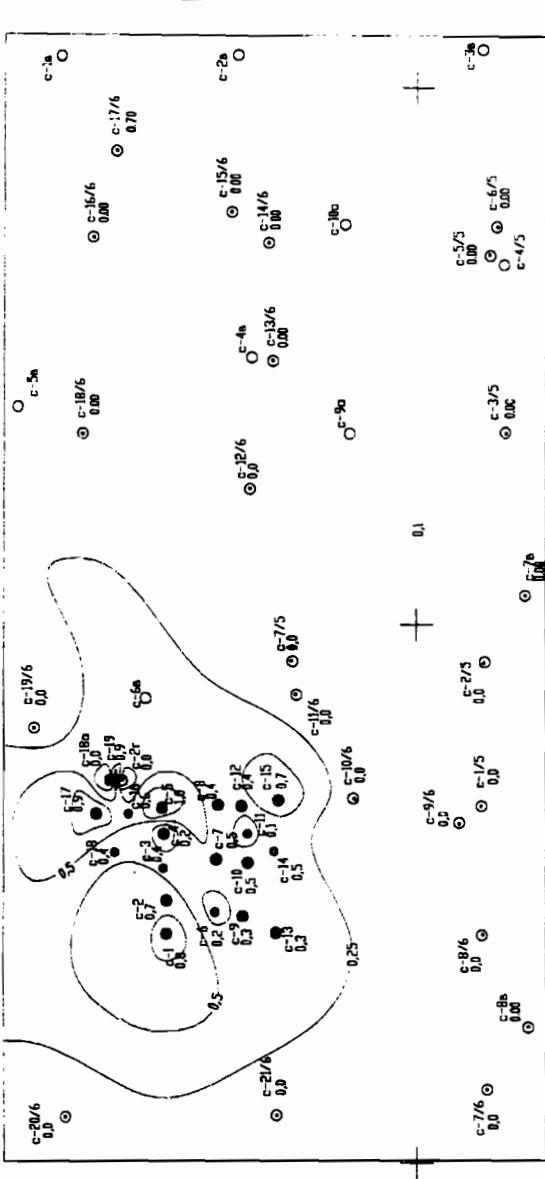


Рис. 1.6. Схема распределения ортоксилита

Условные обозначения см. на рис. 1.1

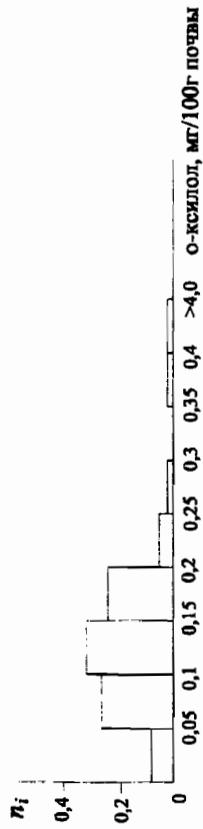


Рис. 1.7. Гистограмма по ортоксилиту (n_i - частость)

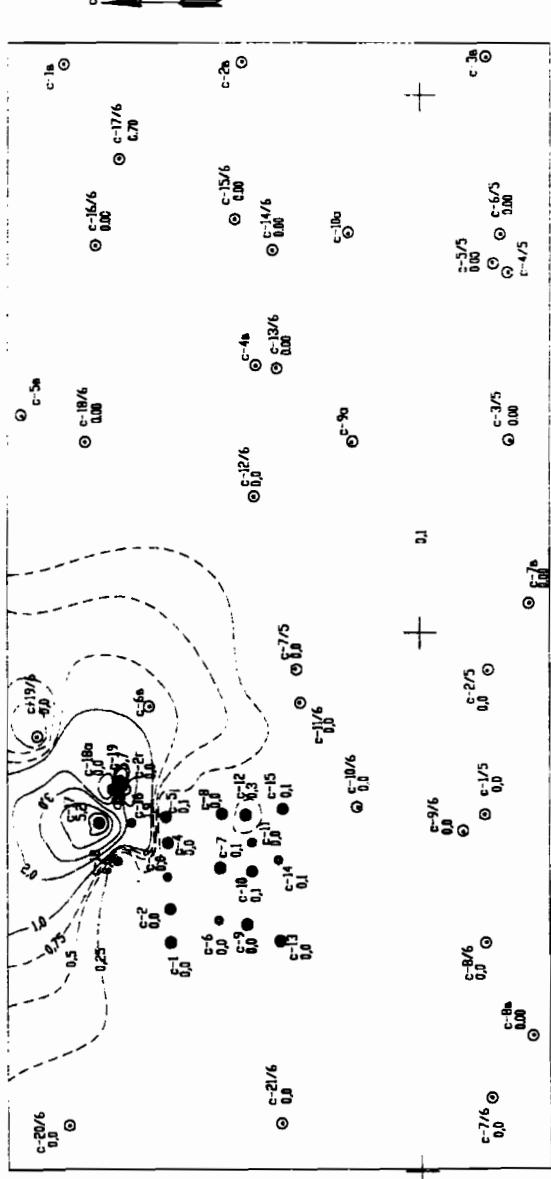


Рис. 1.8. Схема распределения стирола
Условные обозначения см. на рис. 1.1

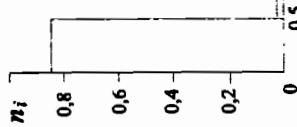


Рис. 1.9. Гистограмма по стиролу (n_i - частота)

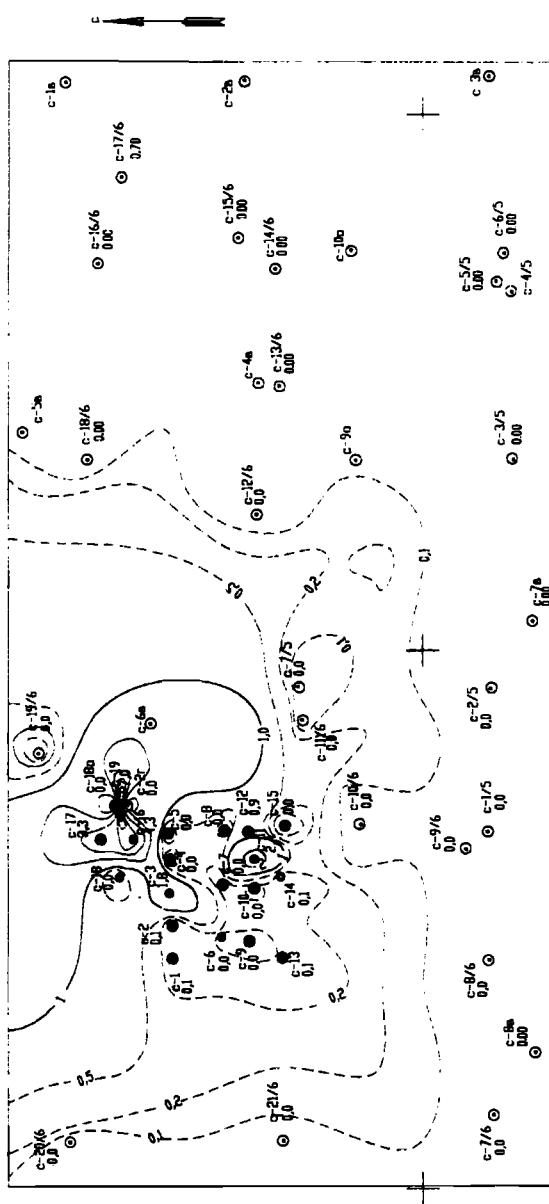


Рис. 1.10. Схема распределения этилбензола

Условные обозначения см. на рис. 1.1



Рис. 1.11. Гистограмма по этилбензолу (n_i - частота)

Толуол встречен в 37 пробах. Высокие концентрации обнаружены в скв. 19, 9/6, 1/5 (рис. 1.12). В скв. 19 высокие концентрации обнаружены на глубине 4-5 м и приурочены к пескам и песчаникам.

Распределение толуола подчиняется следующей статистической зависимости:

$$K_T = -0,0366 + 0,163 h \text{ при } r = 0,55 \quad (1.1)$$

где K_T – концентрация толуола, мг/100 г почвы,

h – глубина отбора проб, м,

r – коэффициент корреляции.

Изомасляный альдегид встречен в 16 пробах. Значения концентраций изменяются от следов до 45,2 мг/100 г почвы в скв. 13/6 (рис. 1.14). Необходимо отметить, что данное соединение отсутствует на западе и востоке территории. Высокие концентрации наблюдаются в скважинах 19/6, 18/6, 16/6, 13/6, 6/5, 11/6.

Нормально-масляный альдегид количественно определён только в скв. 17/6. Следы обнаружены в скв. 19/6, 2/5, 11/6, 15/6, 14/6, 6/5, 3/5, 13/6, 5/5, 16/6.

Изменение концентраций изобутилового спирта приведено на рис. 1.15. Высокие концентрации наблюдаются в скв. 13/6, 7в, 8в, 3в, 2в, расположенных в южной и юго-восточной части площадки. Аналогично распространяется и нормальный бутиловый спирт (рис. 1.16). Коэффициент корреляции r между спиртами равен 0,55.

Изменение концентраций 2-этилгексанала по площади приведено на рис. 1.17. Повышенные концентрации встречены в районе скв. 14/6.

Проведённый анализ карт, построенных в изолиниях, показывает, что существует деление площади по количественно-качественному составу на две зоны – западную, в которой распространена группа ароматических углеводородов с относительно невысокими концентрациями, и восточную, загрязнённую кислородсодержащими производными бутана.

Карта распределения суммарного количества УВ (рис. 1.18) подтверждает, что выделяются две зоны: западная, где суммарная концентрация УВ меньше 10 мг/100 г почвы, и восточная, где она выше 10 мг/100 г почвы, за исключением скв. 3/5.

Для западной части исследуемой территории распределение суммы УВ характеризуется асимметричным видом с модальным интервалом 0–1,0 мг/100 г почвы (при mode, равной 0,6 мг/100 г почвы), при среднем значении $\bar{x} = 0,86$ мг/100 г почвы.

Вид гистограммы показывает, что она близка к логнормальному распределению. Среднеквадратичное отклонение (σ) для данной величины – 0,81 мг/100 г почвы. Используя правило 3σ , разделим сумму УВ на нормальную и аномальную составляющие из условий, что аномальные концентрации – это те концентрации, значения которых больше величины

$$\bar{x} + 3\sigma = 0,86 + 3 \times 0,81 = 3,29 \text{ мг/100 г почвы.} \quad (1.2)$$

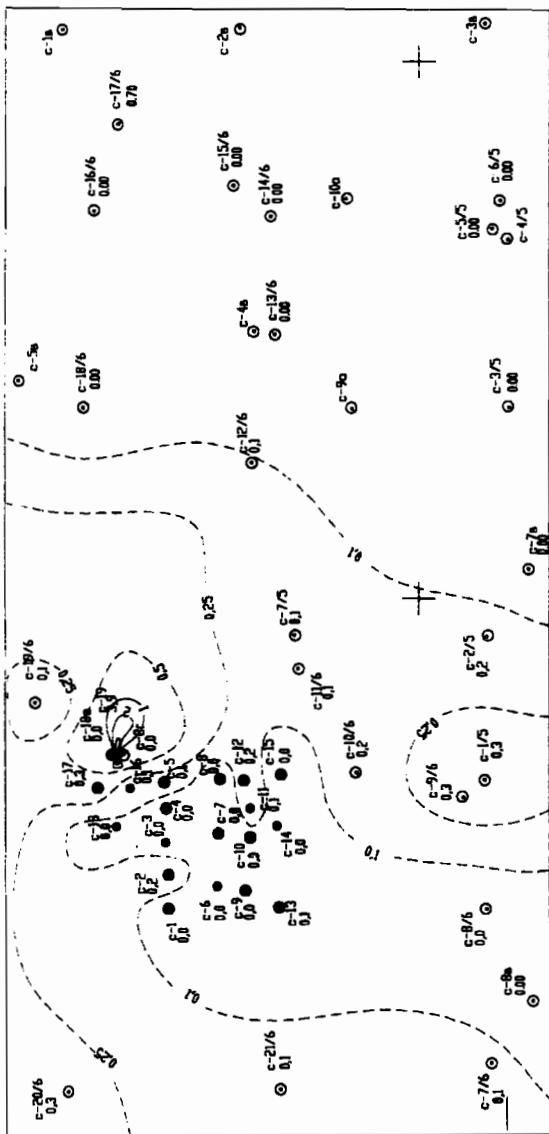
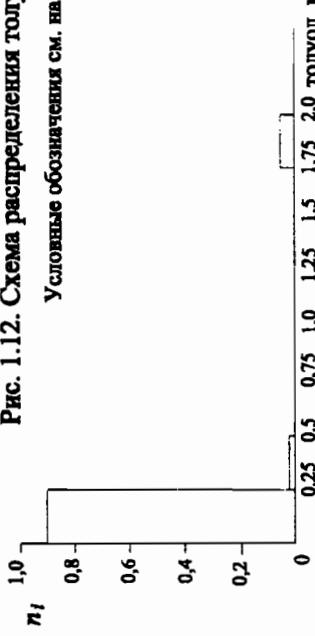


Рис. 1.12. Схема распределения толуола

Условные обозначения см. на рис. 1.1

Рис. 1.13. Гистограмма по толуолу (n_l - частота)

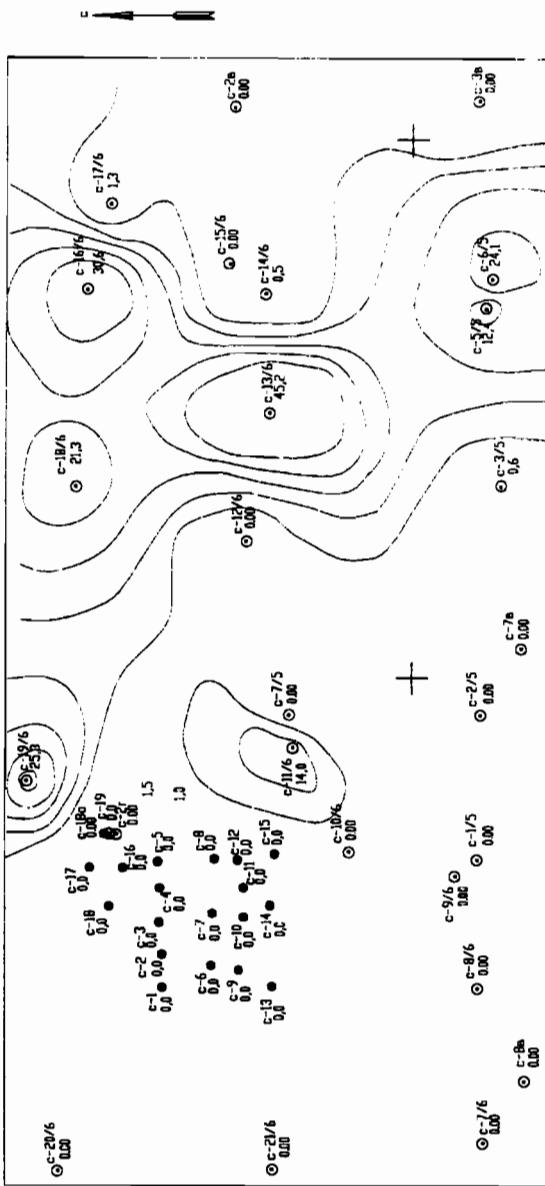


Рис. 1.14. Схема распределения изомасляного альдегида

Условные обозначения см. на рис. 1.1

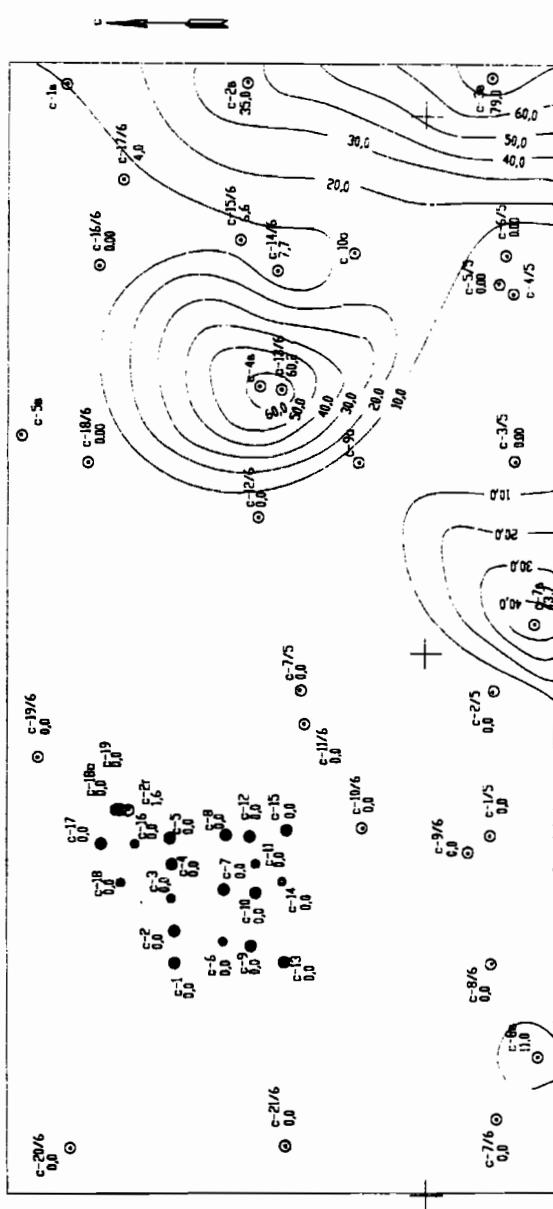


Рис. 1.15. Схема распределения изобутилового спирта

Условные обозначения см. на рис. 1.1

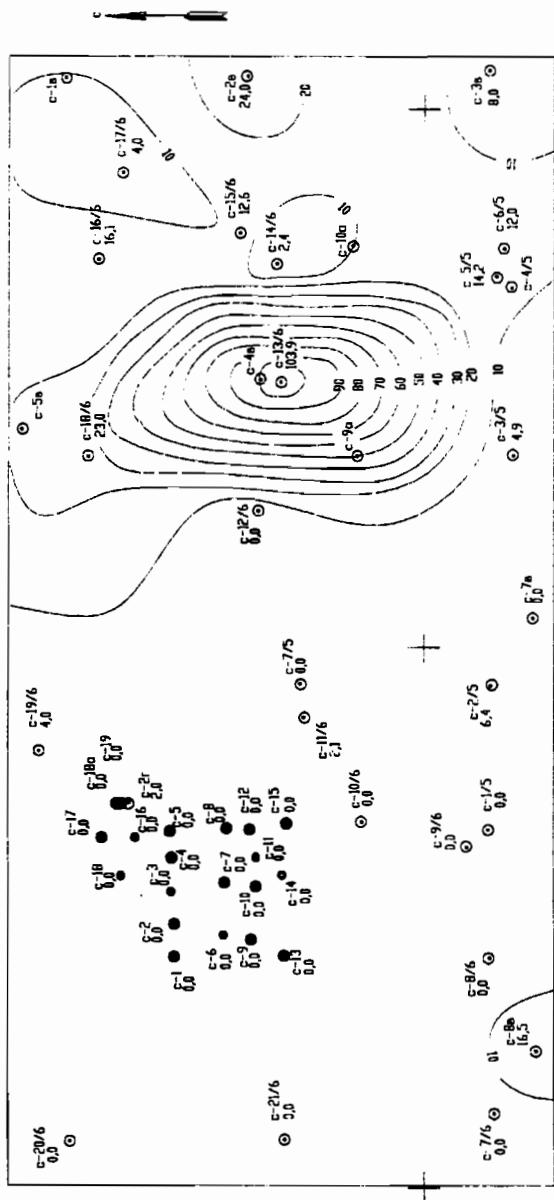


Рис. 1.16. Схема распределения н-бутилового спирта
Условные обозначения см. на рис. 1.1

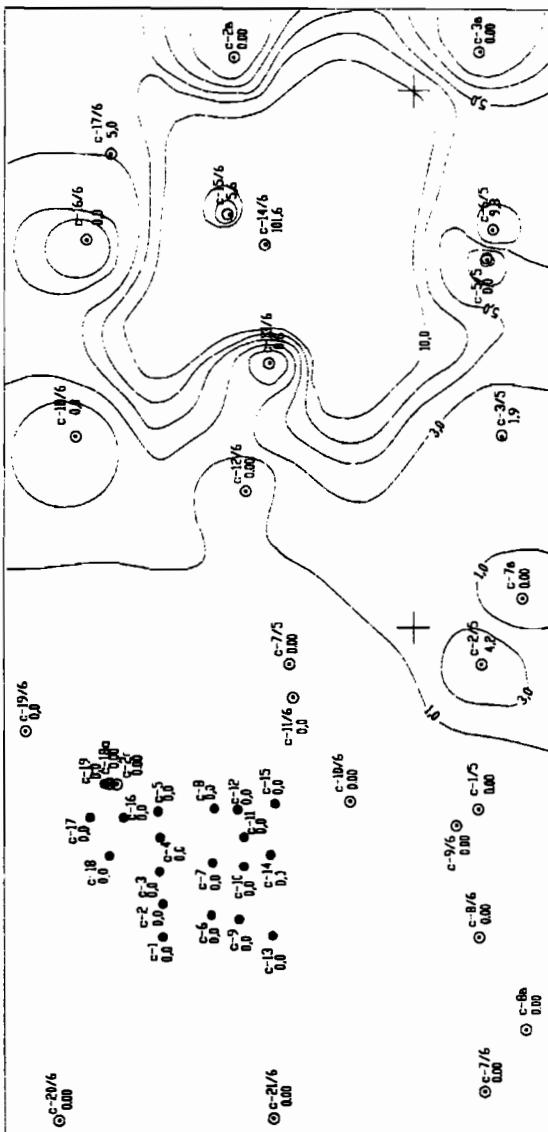


Рис. 1.17. Схема распределения 2-этилгексанола
Условные обозначения см. на рис. 1.1

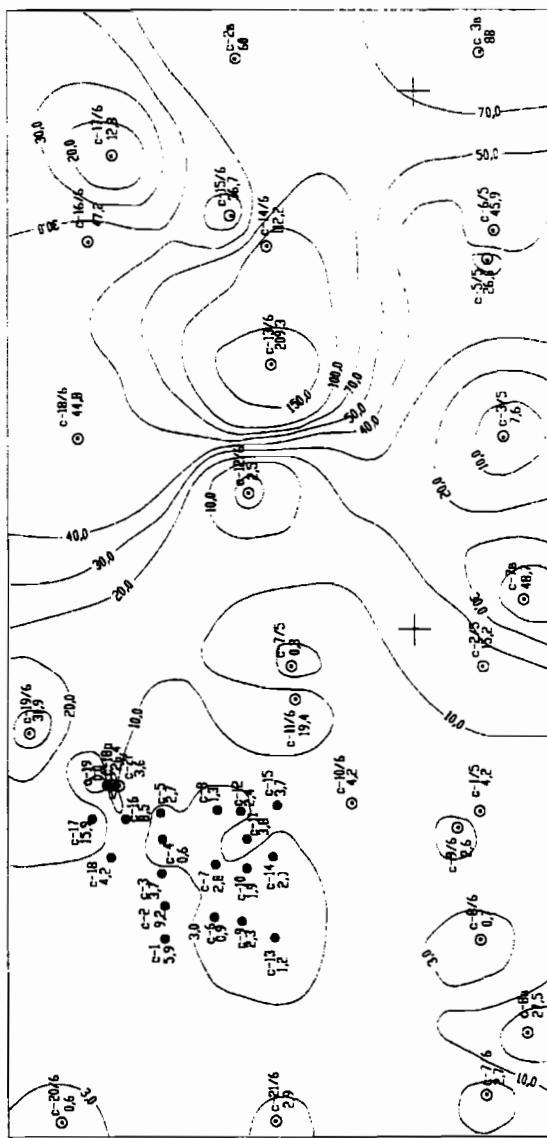


Рис. 1.18. Схема распределения суммарного количества углеводородов

Условные обозначения см. на рис. 1.1

Отсюда аномальные концентрации относительно среднего значения составляют больше 3,29 мг/100 г почвы, а относительно модального несколько ниже – 3,03 мг/100 г почвы.

Рассмотрим примеры распределения углеводородов по разрезу. Анализ показывает, что по разрезу исследуемой толщи бензол не имеет закономерного распределения. Метапараксилол обнаружен в значительном количестве образцов, при этом наблюдается неявно выраженная тенденция: с увеличением глубины содержание его уменьшается. Размах выборки по этому показателю ниже, чем у бензола. Ортоксилол также содержится во многих пробах, его распределение по разрезу подчиняется той же закономерности, что и у метапараксилола. Стирол, этилбензол и толуол обнаружены в небольших количествах образцов, поэтому явно выраженной закономерности их распределения по разрезу установить достаточно сложно.

На рис. 1.19 приведены графики распределения углеводородов по разрезу скважин 17 и 19. По графикам видно, что в скв. 17 углеводороды приурочены к суглинкам в интервале глубин 1,5–4,0 м. В скв. 19 закон распределения углеводородов по разрезу несколько отличен от вышеуказанного, бензол и ортоксилол приурочены к суглинкам, их количественное содержание увеличивается с уменьшением глубины, а содержание метапараксилола, стирола, этилбензола и толуола, наоборот, с уменьшением глубины снижается.

В результате выполненных исследований распределения концентраций УВ на различных уровнях разреза построены графики плотностей (рис. 1.20), по которым видно, что на глубине 0,25 м плотность распределения концентраций характеризуется двухмодальным видом. Причем при концентрации от 0 до 7 мг/100 г почвы закон распределения симметричен при модальной концентрации 1,5 мг/100 г почвы. На глубине 0,25 м интервал концентраций 7–10 мг/100 г почвы не наблюдается. Вид кривой показывает о существовании низких и высоких концентраций УВ. На глубине 0,75 м наблюдается асимметричное одномодальное распределение УВ в интервале концентраций 0–10 мг/100 г почвы.

На глубине 1,25 м распределение концентраций почти равномерное в интервале 0,5–3,5 мг/100 г почвы, а на глубине 1,75 м распределение одномодальное в интервале 0–5 мг/100 г почвы. На глубине 2,75 м наблюдается распределение с большим диапазоном изменений концентраций. На глубине 3,5 м распределение одномодальное при очень малых значениях концентраций.

Начиная с глубины 4,25 м наблюдается хаотичное распределение концентраций УВ при значениях менее 15 мг/100 г почвы. При концентрациях более 15 мг/100 г почвы частоты встречаемости на разных уровнях разрезов имеют следующие значения: на глубине 4,25 м – 0,22; 5,25 м – 0,25; 5,75 м – 0,57; 6,25–6,75 м – 0,67. Таким образом, с увеличением

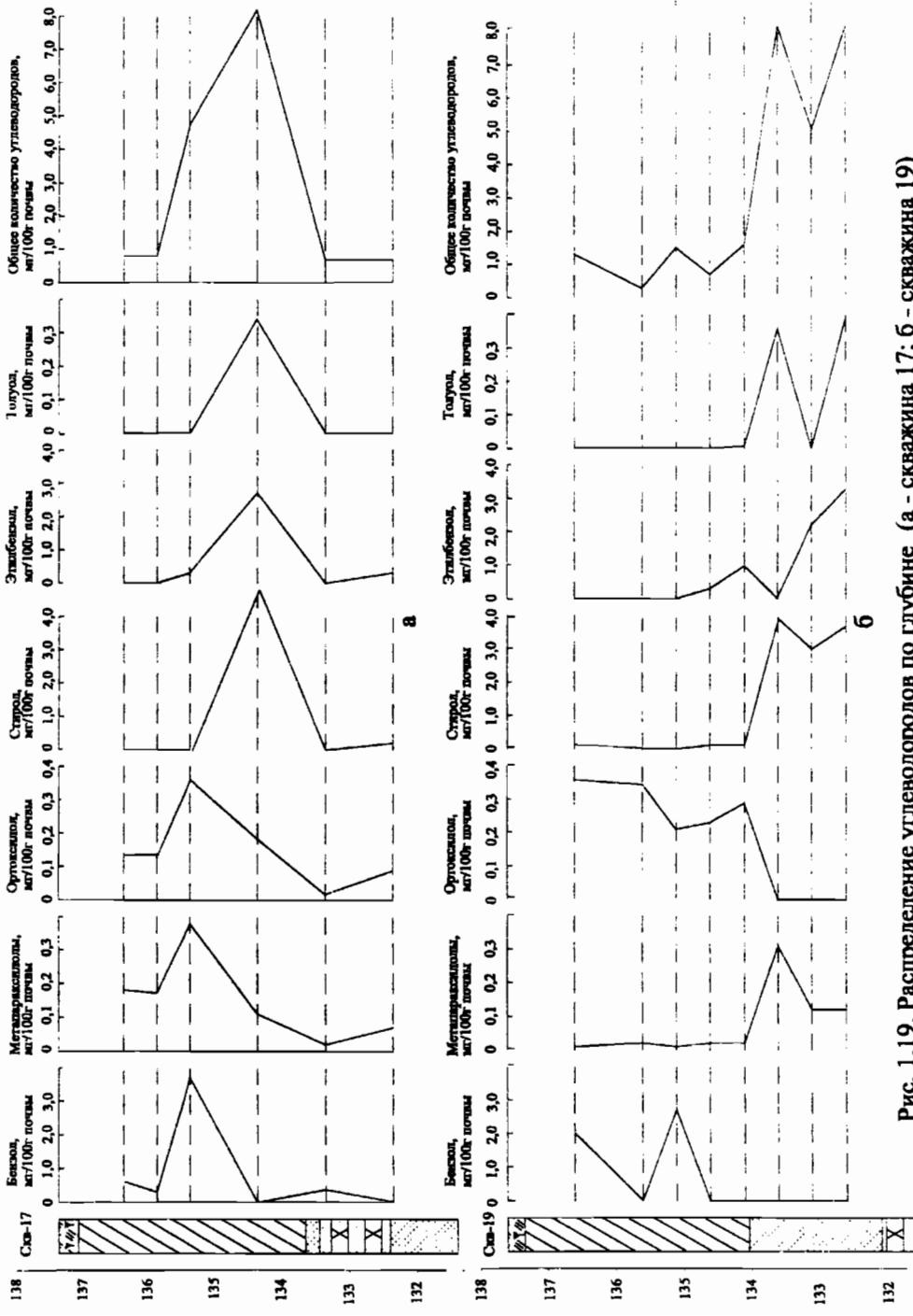


Рис. 1.19. Распределение углеводородов по глубине (а - скважина 17, б - скважина 19)

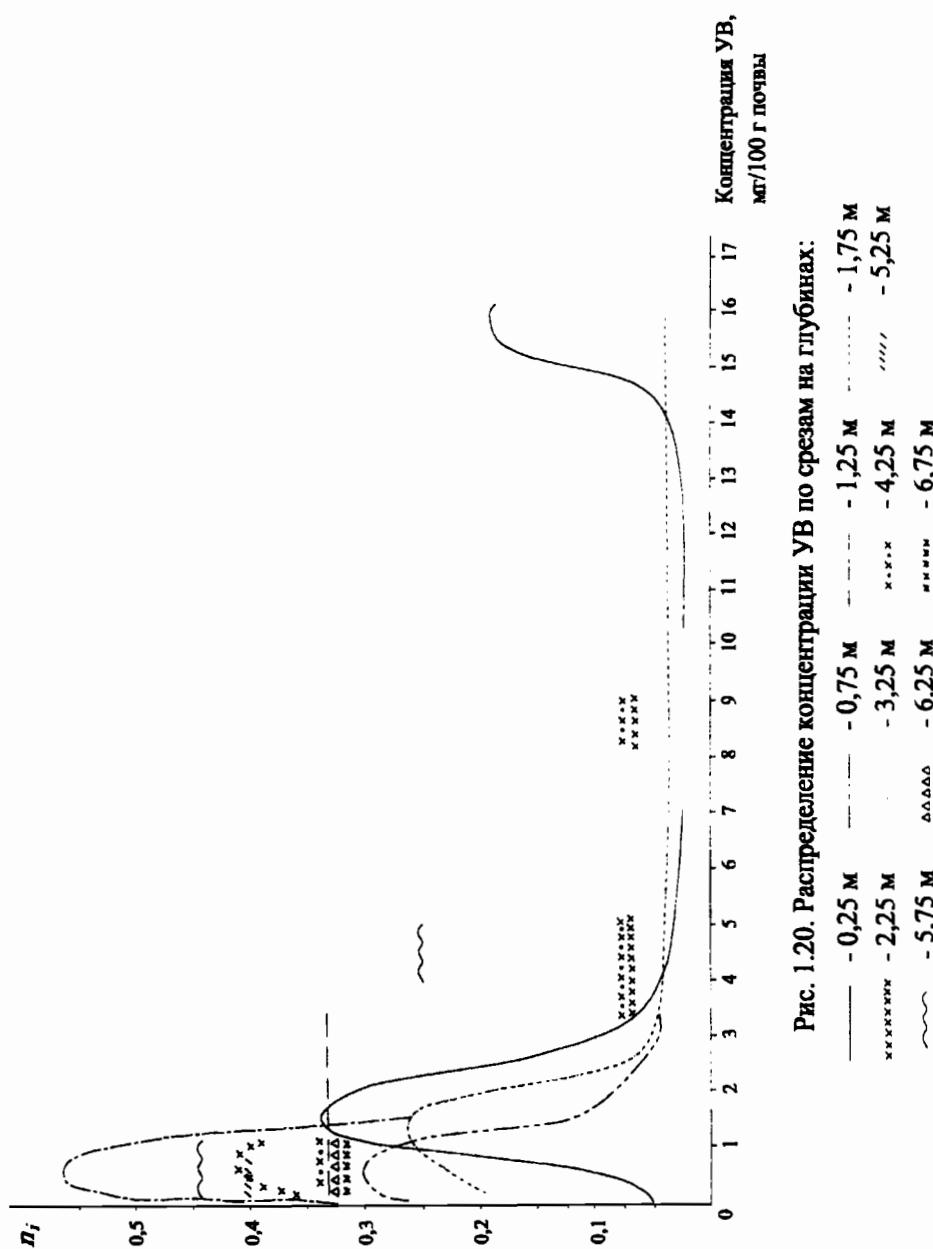


Рис. 1.20. Распределение концентрации УВ по срезам на глубинах:

глубины частота появления высоких концентраций возрастает. Выполненный анализ позволяет установить два уровня распределения УВ по разрезу.

Первый уровень – УВ распределяются практически непрерывно и характеризуются выраженным модальными концентрациями. Второй уровень (начиная с глубины 4,25 м) – где статистически непрерывных распределений УВ не наблюдается из-за малой представительности выборки. Однако с глубиной высокие концентрации УВ встречаются чаще.

Аналогичный анализ распределения концентраций в зависимости от глубины (рис. 1.21) показал, что нулевые концентрации практически равномерно распределяются по глубине. Концентрация $K = 0,5 \text{ мг}/100 \text{ г почвы}$ наиболее часто встречается в интервале 0,5–3,0 м. $K = 1,5 \text{ мг}/100 \text{ г почвы}$ характеризуется одномодальным распределением на глубинах 0–2,5 м.

Распределение концентраций $3,5 \text{ мг}/100 \text{ г почвы}$ аналогично вышеописанным. Начиная с концентрации $4,5 \text{ мг}/100 \text{ г почвы}$ и выше распределение по глубине хаотичное.

Анализ полученных кривых показывает, что идёт направленное изменение законов распределения от равномерного ($K = 0$) через симметричное ($K = 0,5 \text{ мг}/100 \text{ г почвы}$), асимметричное ($K = 1,5 \pm 3,5 \text{ мг}/100 \text{ г почвы}$) к хаотичному ($K = 4,5 \text{ мг}/100 \text{ г почвы}$). Установленная тенденция указывает на существенное изменение концентраций УВ по разрезу.

Таким образом, традиционные геологические методы не позволяют достаточно надежно выявить закономерности распределения углеводородов по разрезу исследуемой толщи.

Для решения поставленной задачи использованы вероятностно-статистические методы и, в частности, регрессионный анализ, который проводился по трем выборкам. В первую вошли скважины, где наблюдается тенденция уменьшения содержания с увеличением глубины. Во вторую – где содержание УВ с глубиной увеличивается. Для третьей выборки характерно хаотичное изменение УВ с глубиной отбора проб. Изучение взаимосвязей производилось с помощью линейной и нелинейной регрессий по девяти наиболее часто используемым в математической статистике уравнениям.

Для первого варианта уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$K = 0,353 + 0,923/h \quad \text{при } r = 0,79, \quad (1.3)$$

где K – концентрация УВ, $\text{мг}/100 \text{ г почвы}$,

h – глубина отбора проб, м.

Проверим, как описывает полученная статистическая модель реальное распределение концентраций по глубине. Установлено, что из 19 скважин, пробуренных в пределах западного участка территории, в 12 скважинах реальное распределение суммы концентраций соответствует

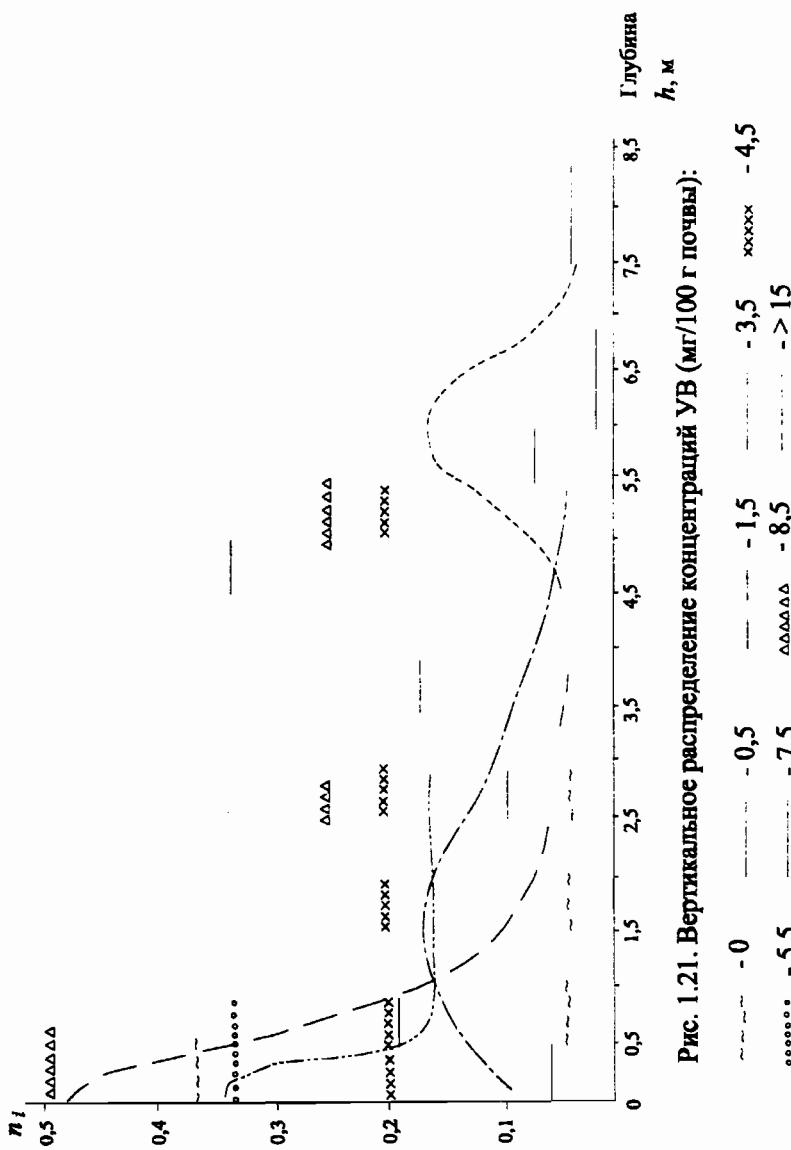


Рис. 1.21. Вертикальное распределение концентраций YB (мг/100 г почвы):

~~~~~ - 0	----- - 0,5	---- - 1,5	----- - 3,5	~~~~~ - 4,5
..... - 5,5	----- - 7,5	$\triangle\triangle\triangle\triangle\triangle$ - 8,5	..... - > 15	

полученной модели, т.е. с глубиной концентрации УВ убывают. В скв. 6, 10, 14, 19 концентрации с глубиной возрастают, т.е. имеет место инверсия модели. Данная группа скважин составляет вторую выборку для построения математической модели, связывающей изменение концентраций УВ с глубиной.

Расчетное уравнение регрессии для второй выборки имеет следующий вид:

$$K = -1,454 + 1,126h \quad \text{при } r = 0,79. \quad (1.4)$$

Распределение УВ по глубине в скв. 15, 16 соответствует третьей принятой модели.

На рис. 1.22 приведено сопоставление полученных моделей распределения УВ с геологическими условиями. По рис. 1.22 видно, что первая модель соответствует условиям, когда суглинок залегает непосредственно на трещиноватых аргиллитах, алевролитах и песчаниках, при этом его мощность составляет 2–3 м. Вторая модель присуща условиям, когда суглинок залегает на высокопроницаемом щебенистом грунте, который подстилает также аргиллиты, алевролиты и песчаники. При этом мощность суглинка не превышает 1,2–1,5 м. Распределение УВ в скв. 15, 16 относится к третьей модели, для которой характерно незакономерное распределение УВ, обусловленное небольшой мощностью суглинков, подстилающих различные грунты (пески, гравелистые породы), которые залегают на аргиллитах, алевролитах и песчаниках.

На основе вышеприведенного можно описать механизм распределения УВ по разрезу массива пород.

При попадании УВ на земную поверхность под воздействием гравитационных сил УВ фильтруются в массив пород. Если не происходит дополнительного поступления УВ в породы, процесс фильтрации заканчивается при достижении равновесия между гравитационными силами и силами, препятствующими миграции УВ. Если уровень грунтовых вод достаточно высок, а масса углеводородов велика, то углеводороды ложатся на водоносный горизонт, который является флюидоупором. Затем происходит перераспределение УВ по разрезу. За счет гравитационных сил идет накопление УВ в верхней приконтактной зоне водоносного горизонта, а за счет капиллярного поднятия происходит накопление УВ в приповерхностной зоне разреза.

На такой процесс распределения УВ, естественно, существенное влияние оказывает тип пород и прежде всего их сорбционная способность к углеводородам, фильтрационные свойства (пористость и проницаемость) и водонасыщенность. Если приповерхностная зона земли сложена песками, которые имеют низкую сорбционную способность к УВ, высокую открытую пористость и высокие фильтрационные свойства, загрязнение углеводородами будет минимальным в отличие от зоны, сложенной из глин или суглинков (см. рис. 1.22).

СКВ. 14

СКВ. 15

СКВ. 3

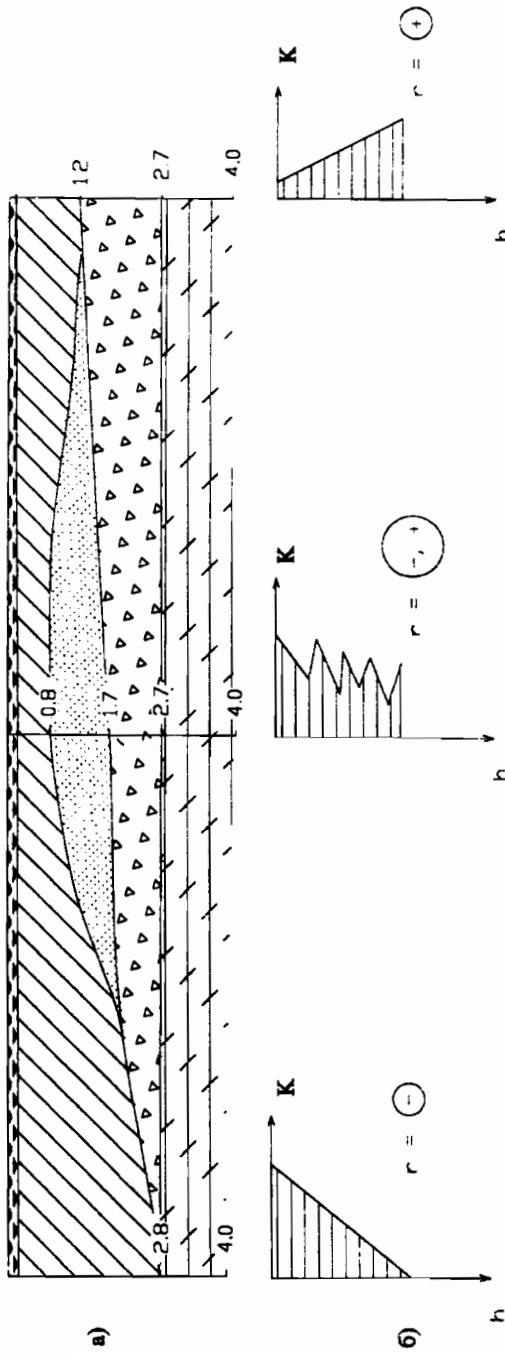


Рис. 1.22. Модели распределения углеводородов по геологическому разрезу:  
а - геологический разрез; б - графики распределения углеводородов

Условные обозначения:

- $\begin{array}{c} \diagup \\ \diagdown \end{array}$  - почвенно-растительный слой;
- $\begin{array}{c} \diagup \diagup \\ \diagdown \diagdown \end{array}$  - суглинок;
- $\begin{array}{c} \diagup \diagup \\ \diagdown \diagdown \end{array}$  - песок;
- $\begin{array}{c} \diagup \diagup \\ \diagdown \diagdown \end{array}$  - щебенистый грунт;
- $\begin{array}{c} \diagup \diagup \\ \diagdown \diagdown \end{array}$  - аргиллит;
- $K$  - концентрация углеводородов в почвогрунтах, мг/100 г почвы;
- $h$  - глубина, м;
- $r$  - коэффициент корреляции

Возникает вопрос, какова доля каждого из исследуемых углеводородов в суммарной концентрации УВ ( $\Sigma$  УВ). Для этого построим и проанализируем корреляционные поля.

Взаимосвязь между  $\Sigma$  УВ и бензола приведена на рис. 1.23. По рисунку видно, что выделяются два поля точек: первое – когда при увеличении содержания бензола  $\Sigma$  УВ закономерно повышается, и второе – когда бензол и  $\Sigma$  УВ между собой не коррелируют, причём это относится и к нормальной, и к аномальной составляющим. По  $\Sigma$  УВ аномальных концентраций (больше 3,3 мг/100 г почвы) – 10, причём 4 сформировались за счёт повышения содержания бензола (скв. 1, гл. 5,0 м; скв. 17, гл. 2,0 м; скв. 18, гл. 1,0 м; скв. 2, гл. 3,0 м). Необходимо отметить, что в скв. 2 в пробе на глубине 1,0 м концентрации близки к аномальным (3,149 мг/100 г почвы).

Взаимосвязь этилбензола с  $\Sigma$  УВ практически отсутствует (рис. 1.24). Наблюдается визуальная зависимость только по 4 пробам, из которых 2 – аномальные (скв. 19, гл. 4,5; 5,0 м).

Взаимосвязь ортоксиола с  $\Sigma$  УВ наблюдается при незначительных концентрациях, тогда как при аномальных концентрациях она нарушается (рис. 1.25).

Корреляционное поле метапараксилола и  $\Sigma$  УВ приведено на рис. 1.26. Отсюда видно, что долей метапараксилола во многом определяется содержание УВ в скв. 19 на гл. 4,0; 4,5; 5,0 м.

При корреляции  $\Sigma$  УВ со стиролом (рис. 1.27) наблюдаем наличие связей при высоких их концентрациях, которые фиксируются в скв. 19 (гл. 4,0; 4,5; 5,0 м), 17 (гл. 3,0 м), 16 (гл. 3,0 м).

Связь между толуолом и  $\Sigma$  УВ приведена на рис. 1.28.

Выполненный комплексный анализ показывает, что из всех рассмотренных скважин выделяется своими аномальными концентрациями УВ скв. 19. Если в остальных скважинах высокие концентрации наблюдаются в основном на глубине 1–2 м, то в данной скважине они определены на глубинах 4–5 м, аномальные концентрации возникли за счёт метапараксилола, стирола, этилбензола и толуола. В скв. 17 на глубине 3 м зафиксирована проба, которая по своим количественно-качественным характеристикам близка к пробам, отобранным из скв. 19. На остальной территории концентрации УВ повышаются в основном за счёт высоких концентраций бензола.

Для оценки влияния типов грунтов на наличие аномальных концентраций УВ проделан следующий анализ. По карте суммарных изоконцентраций в пределах западной части территории выделено две группы скважин: первая – с повышенными концентрациями (скв. 1, 2, 18, 17, 16, 19) и вторая – с фоновыми концентрациями УВ (скв. 13, 10, 14, 7, 3, 4, 5, 8, 11, 6, 12, 15).

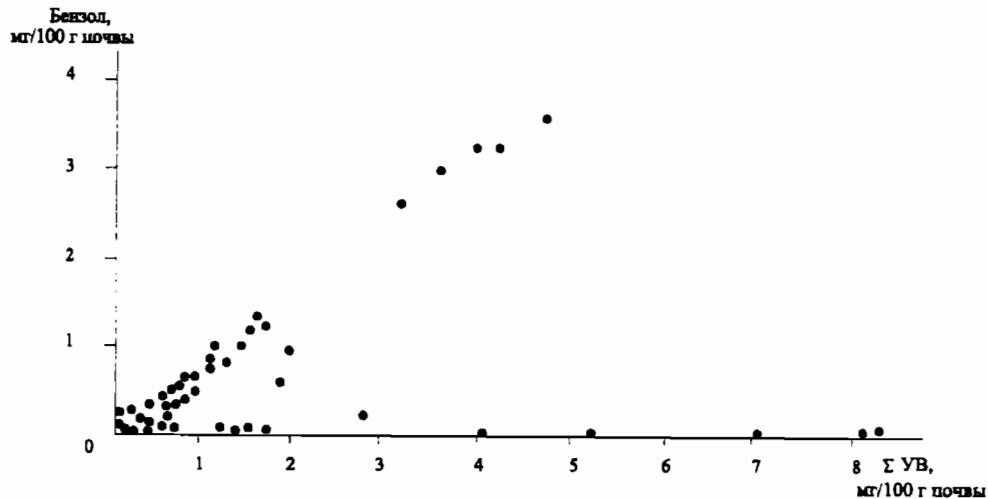


Рис. 1.23. Корреляционное поле бензола и суммарного содержания углеводородов ( $r = 0,63, t_p > t_t$ )

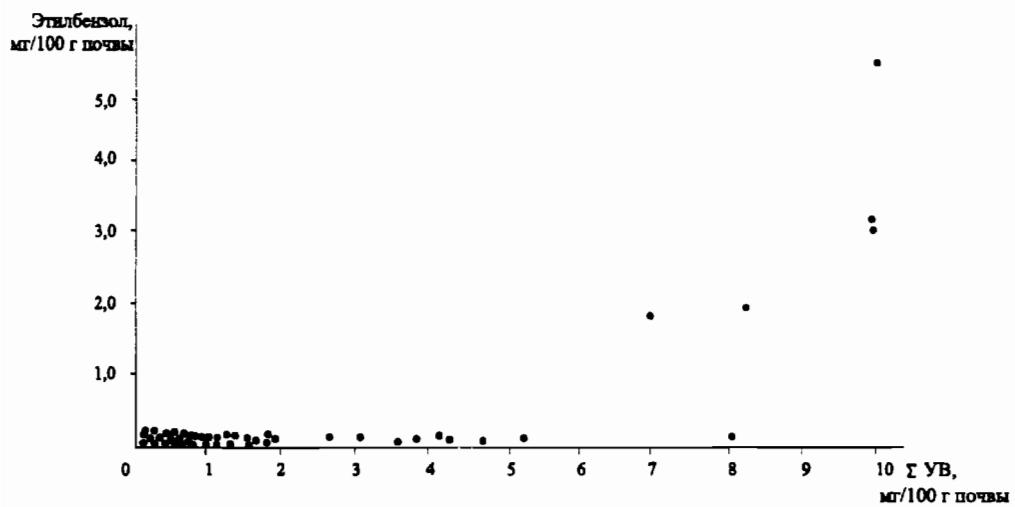


Рис. 1.24. Корреляционное поле этилбензола и суммарного содержания углеводородов ( $r = 0,22, t_p < t_t$ )

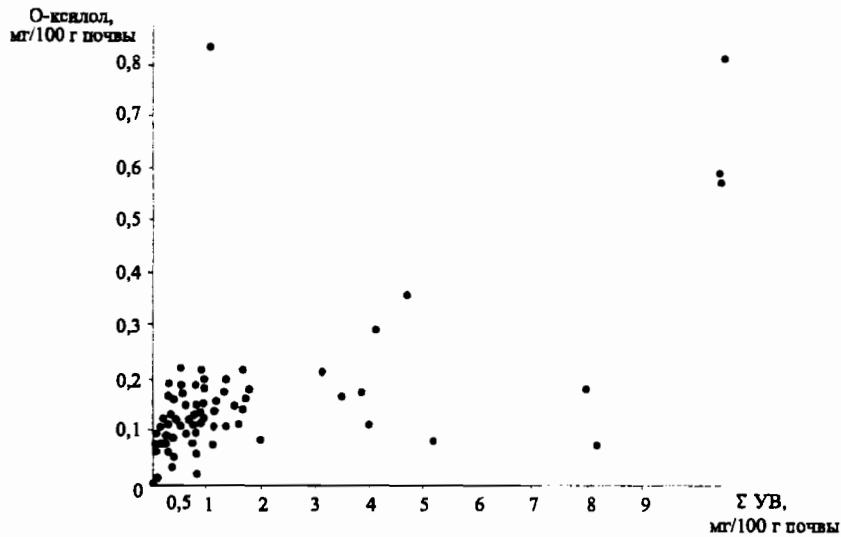


Рис. 1.25. Корреляционное поле ортоксилола и суммарного содержания углеводородов ( $r = 0,56, t_p > t_t$ )

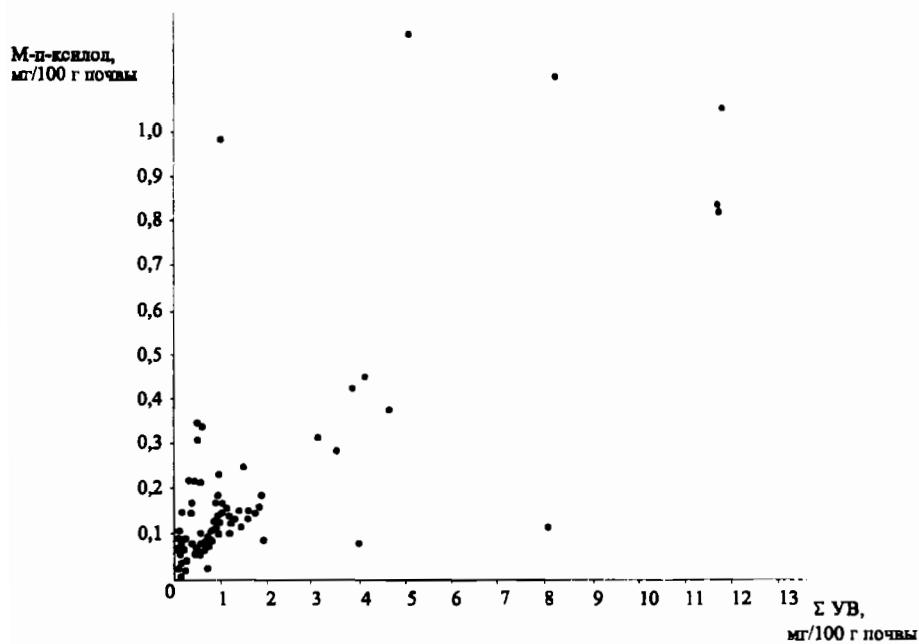


Рис. 1.26. Корреляционное поле метапараоксилола и суммарного содержания углеводородов ( $r = 0,61, t_p > t_t$ )

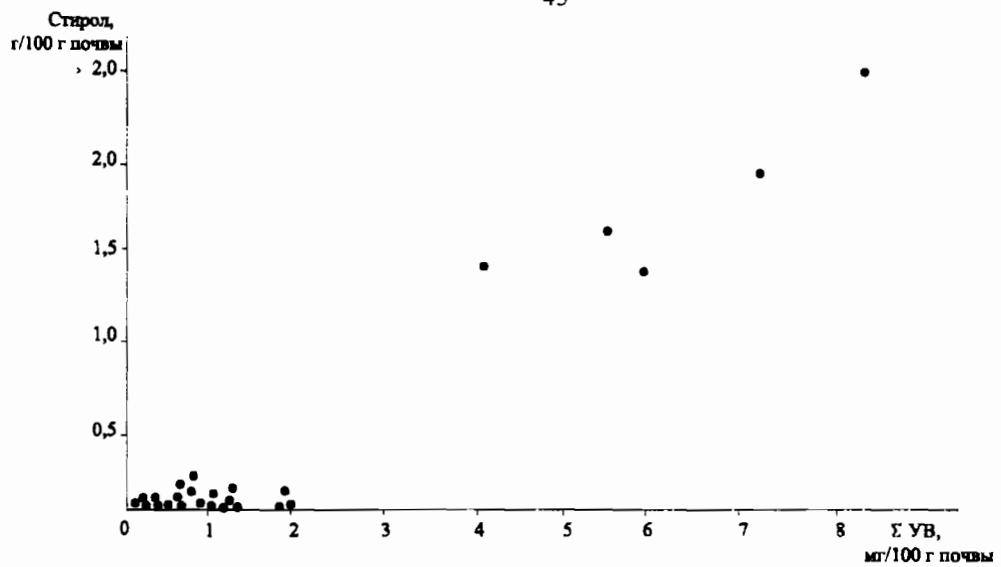


Рис. 1.27. Корреляционное поле стирола и суммарного содержания углеводородов ( $r = 0,68, t_p > t_t$ )

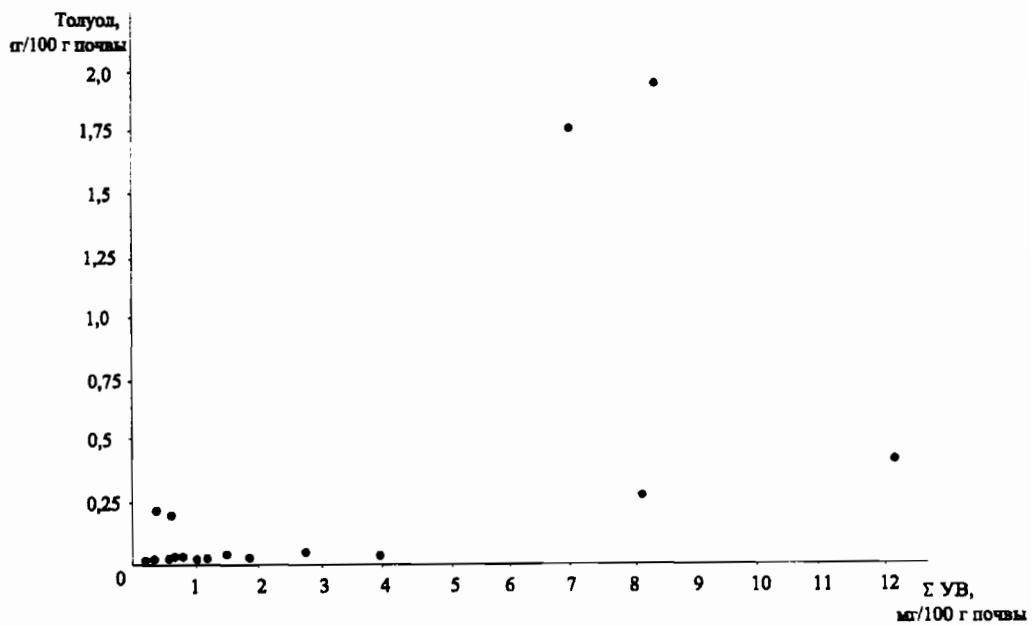


Рис. 1.28. Корреляционное поле толуола и суммарного содержания углеводородов ( $r = 0,23, t_p < t_t$ )

По данным двух выборок построены гистограммы по мощностям различного типа грунтов и средней глубине их залегания. Анализировались следующие виды пород: почвенно-растительный слой, суглинок, щебенистый грунт аргиллита, насыпной грунт, алевролит, песчаник, песок. Затем определялась их индивидуальная информативность по критериям  $t$  и  $F$  с доверительной вероятностью 0,95.

Информативными показателями оказались мощность суглинка ( $m_2$ ) и, в определённой мере, глубина залегания песчаников. Затем гистограммы по мощности были перестроены в вероятностную кривую (рис. 1.29), по которой видно, что с увеличением мощности суглинка вероятность  $P(A)$  высоких концентраций УВ закономерно возрастает.

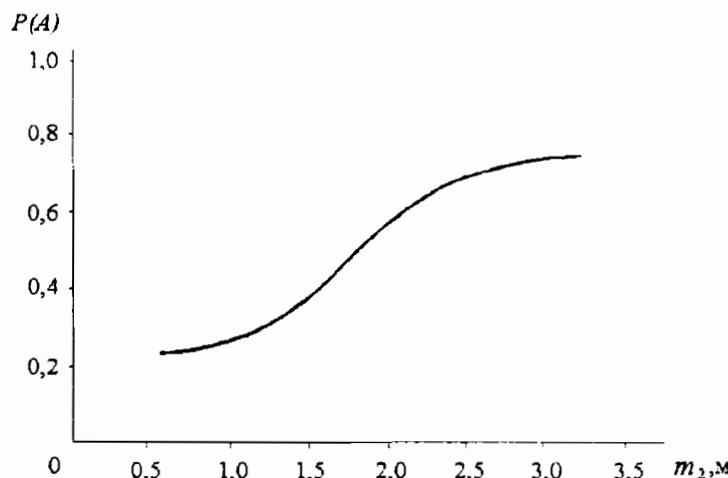


Рис. 1.29. Вероятность обнаружения нефтепродуктов в зависимости от мощности суглинка

В результате статистической обработки установлено, что на содержание УВ на глубине 1 м влияет наличие насыпного грунта. Нами проведен анализ зависимости количества УВ на глубине 1 м от мощности насыпного грунта и установлено, что при наличии последнего в среднем количество УВ значительно выше, чем в случае, когда насыпной грунт отсутствует.

С целью установления влияния особенностей геологического строения на содержание УВ в пределах западной части территории нами выполнен линейный дискриминантный анализ (ЛДА).

Возможность построения линейной дискриминантной функции (ЛДФ) сводится к следующему. Если обозначить через  $X_{ij}$  значение переменной с номером  $i$  в точке наблюдения с номером  $j$ , взятой из выборки, характеризующей геологические условия с повышенными потенциальными возможностями накопления аномалийных содержаний ароматических углеводородов, то в результате может быть получена матрица  $W_1$  порядка  $m$  и  $n_1$  результатов наблюдений над этой выборкой:

$$W_1 = \begin{vmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n_1} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn_1} \end{vmatrix} \quad (1.5)$$

Обозначим через  $X^1_{ij}$  результат измерения переменной с номером  $i$  в точке с номером  $j$ , взятой из выборки, характеризующей геологические условия, неблагоприятные для накопления повышенных концентраций ароматических углеводородов. В результате получим матрицу  $W_2$  порядка  $m \times n_2$ :

$$W_2 = \begin{vmatrix} X^1_{11} & X^1_{12} & \dots & X^1_{1n_2} \\ X^1_{21} & X^1_{22} & \dots & X^1_{2n_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X^1_{m1} & X^1_{m2} & \dots & X^1_{mn_2} \end{vmatrix} \quad (1.6)$$

где  $m$  – число показателей;

$n_1, n_2$  – объем выборок.

Для построения ЛДФ составляются матрицы центрированных сумм квадратов и смешенных произведений  $\tilde{S}_{W_1}$  и  $\tilde{S}_{W_2}$ , по ней вычисляется выборная матрица

$$M = \frac{1}{n_1 + n_2 - 2} (\tilde{S}_{W_1} + \tilde{S}_{W_2}). \quad (1.7)$$

Для определения коэффициентов линейной дискриминантной функции находится обратная выборочная ковариационная матрица – матрица  $C$ .

Коэффициенты дискриминантной функции вычисляют по формуле

$$a_m = \sum_{i=1}^m C_{mi} (\bar{X}_m^{W_1} - \bar{X}_m^{W_2}), \quad (1.8)$$

где  $C_{mj}$  – элементы обратной матрицы  $C$ ,  $\bar{X}$  – среднее значение соответствующего показателя.

Затем вычисляют граничное значение дискриминантной функции ( $R_0$ ), которое делит значение на два подмножества, принадлежащих разным классам по формуле

$$R_0 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m a_m (\bar{X}_m^{W_1} - \bar{X}_m^{W_2}), \quad (1.9)$$

при  $R > R_0$  объект принадлежит классу  $W_1$  и наоборот.

Надежность классификации определяют с помощью критериев  $\chi^2$  Пирсона, критерия Фишера и расстояния Махalanобиса.

В целом математическая модель выделения геологических участков с потенциальными возможностями наполнения аномалийных концентраций углеводородов, основанная на линейном дискриминантном анализе, является мощным статистическим методом, отличается простотой, хорошей интерпретируемостью. Она позволяет производить отбор наиболее информативных показателей, что дает возможность снизить размерность исходного признакового пространства.

ДДА проводился по следующим показателям:

$m_1$  – мощность почвенно-растительного слоя,

$h_1$  – средняя глубина залегания почвенно-растительного слоя,

$m_2$  – мощность суглинка,

$h_2$  – средняя глубина залегания суглинка,

$m_3$  – мощность щебенистого грунта аргиллита,

$h_3$  – средняя глубина залегания щебенистого грунта аргиллита,

$m_4$  – мощность насыпного грунта,

$h_4$  – средняя глубина насыпного грунта,

$m_5$  – мощность алевролита,

$h_5$  – средняя глубина залегания алевролита,

$m_6$  – мощность песчаника,

$h_6$  – средняя глубина залегания песчаника,

$m_7$  – мощность песка,

$h_7$  – средняя глубина залегания песка.

Расчеты производились на ПЭВМ. При нулевом шаге наиболее информативным показателем по критерию  $F$  оказался показатель  $m_2$  ( $F=8,669$ ), на первом шаге –  $m_3$ , втором –  $h_6$ .

По данным показателям процент верных реализаций составил 94,7%. Вероятность правильной классификации для первого класса (скв. 1, 2, 18, 17, 16, 19) составила 94%, для второго (скв. 9, 13, 10, 14, 7, 3, 4, 5, 8, 11, 12, 6) – 83%.

Таким образом, полученное разделение свидетельствует о значительном влиянии геологического строения на формирование высоких концентраций УВ. Линейная дискриминантная функция имеет следующий вид:

$$R = 2,26m_2 + 4,44m_3 + 0,52h_6 - 4,83. \quad (1.10)$$

Средние значения канонических переменных в группах следующие: в первой – 2,49216, во второй – 1,15023. Количественных связей между содержанием концентраций и другими факторами для остальной территории выявить не удалось.

Если рассмотреть разделение аномалийных и фоновых концентраций относительно модального значения, то вся обучающая выборка будет расклассифицирована верно для обоих классов обучения.

Данная ЛДФ имеет следующий вид:

$$R = 1,59m_2 + 10,99m_3 + 1,09h_6 - 5,50. \quad (1.11)$$

Среднее значение канонических переменных в первой группе – 1,72, во второй – 1,00, при отношении  $\chi^2_p/\chi^2_f = 3,01$ , при  $p = 0,0008$ . Вероятно, исходя из одномодального закона распределения значений по концентрациям и лучшего разделения с помощью ЛДА, в практических целях целесообразнее использовать вторую модель.

Таким образом, используя полученную математическую модель, можно по геологическим показателям (мощностям суглинка и щебенистого грунта, а также глубине залегания песчаников) прогнозировать степень загрязнения территории углеводородами, т.е. выделить участки с повышенным по сравнению с фоном содержанием УВ в почвогрунтах.

Согласно СП 11-102-97, химическое загрязнение почв и грунтов оценивается по суммарному показателю химического загрязнения, являющемуся индикатором неблагоприятного воздействия на здоровье населения.

Суммарный показатель химического загрязнения характеризует степень химического загрязнения почв и грунтов обследуемых территорий вредными веществами различных классов опасности и определяется как сумма концентрации отдельных компонентов загрязнения.

Продукты нефтепереработки, согласно указанному СП, относятся ко 2-му классу опасности. Для них коэффициенты концентрации определяются как частное от деления массовой доли загрязнителя на его ПДК. По суммарному содержанию углеводородов (см. СП 11-102-97, прил. Б) ПДК составляет 300 мг/100 г почвы.

При степени загрязнения почвогрунтов больше 5 ПДК территория загрязнения относится к сильноопасным по неблагоприятному воздействию на здоровье человека; от 2 до 5 ПДК – к среднеопасным; от 1 до 2 ПДК к слабоопасным.

По вышеприведенным данным по территории исследований была построена схема загрязнения территории нефтепродуктами (рис. 1.30), по которой видно, что выделяются сильноопасные (на востоке, западе и юго-западе), опасные (в основном на западе) и слабоопасные участки. Необходимо отметить, что на юго-западе наблюдается наиболее дифференцированная картина по степени загрязнения территории УВ, где имеются все виды по степени опасности. Поэтому этот участок был выбран как эталонный для проведения на нем очистных работ. В следующем разделе монографии будут рассмотрены данные по эффективности применяемых методов санации именно этой экспериментальной площади.

#### **1.4. Прогнозирование загрязнения почвогрунтов углеводородами**

На основании вышеприведенных закономерностей распределения углеводородов в грунтовом массиве и построенных математических моделей можно прогнозировать степень загрязнения почвогрунтов. Для прогноза загрязнения по глубине необходимо использовать в зависимости от геологических условий одну из следующих моделей.

В случае, если мощность суглинков, которые подстилают породы шешминского горизонта, более 3 м, используется уравнение регрессии

$$K = 0,353 + 0,923/h \quad \text{при } r = 0,79, \quad (1.12)$$

где  $K$  - концентрация УВ, мг/100 г почвы,

$h$  - глубина отбора проб, м.

В случае, если мощность суглинков, которые подстилают породы шешминского горизонта, менее 1 м, используется уравнение регрессии

$$K = -1,454 + 1,126h \quad \text{при } r=0,79. \quad (1.13)$$

На рис. 1.22 приведено сопоставление этих моделей распределения УВ с геологическими условиями.

Для прогноза загрязнения по площади используется следующая модель:

$$R = 1,59m_2 + 10,99m_3 + 1,09h_6 - 5,50. \quad (1.14)$$

Средние значения канонических переменных в группах следующие: в первой - 2,49216, во второй - 1,15023.

Используя данную математическую модель с учетом потенциальной возможности загрязнения, связанной с технологическим процессом, можно по геологическим показателям: мощностям суглинка и щебенистого грунта, а также глубине залегания песчаников, прогнозировать степень загрязнения территории углеводородами, т.е. выделить участки с повышенным содержанием УВ в почвогрунтах.

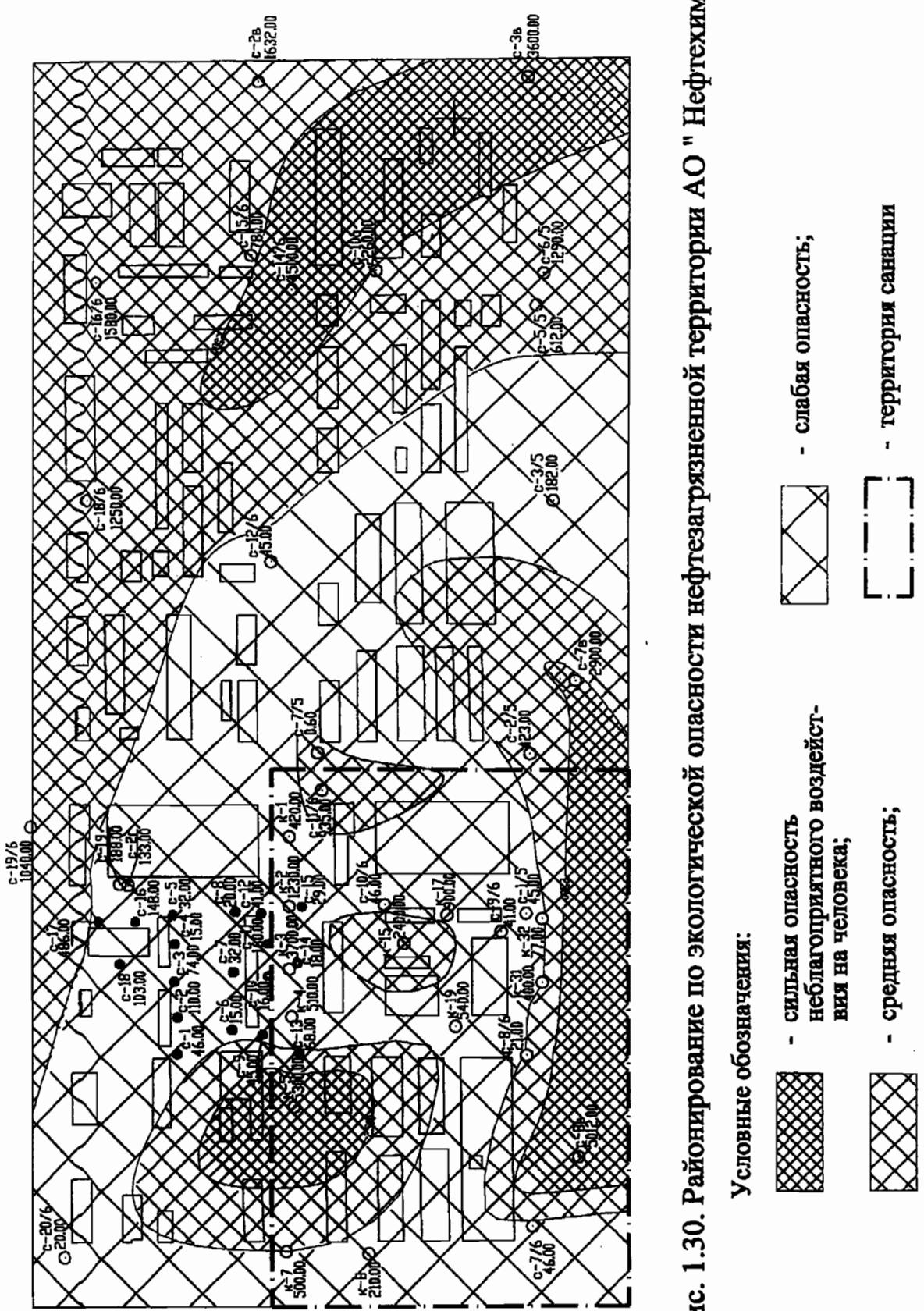


Рис. 1.30. Районирование по экологической опасности нефтезагрязненной территории АО "Нефтехимик"

## **2. ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ САНАЦИИ**

Очистка грунтов загрязненных углеводородами проводилась на части территории цеха № 30 АО «Нефтехимик» (рис. 2.1). Обоснование выбора именно этой эталонной площадки для выполнения исследований по санации приведено в предыдущем разделе данной монографии.

### ***2.1. Методика работ***

Территории с травяным покрытием сантировались микробиологическим способом, с выпавшим травяным покровом – агротехническим и фитологическим способами.

Для контроля за динамикой загрязнения грунтов на каждом участке были установлены реперы, возле которых бурились опорные скважины. Скважины бурились в мае (до начала санации), в июле (в процессе санации) и в сентябре (в конце работ по санации). Из каждой скважины отбирались пробы грунта. В пробах грунта хроматографическим анализом определялось качество и количество углеводородов, загрязняющих исследуемую территорию.

Агротехническим способом производилась очистка территорий в районе установки 201/14 – опорная скв. № 5 (рис. 2.2) и на участке между установками 201/19 и 201/20 – опорная скв. № 17.

Технологическая карта очистки грунтов приведена в табл. 2.1, результаты хроматографических анализов проб грунта – в табл. 2.2.

Микробиологический способ использовался на участках в районах установок 41 и 71 – опорные скв. 1, 2 и 3, между установками 41, 201/19 и 201/17 – опорные скв. 13 и 15, в районе установок 201/15, 201/16 и 201/18 – опорная скв. 19, и 201/20 – опорная скв. 32.

В технологическом плане микробиологический способ санации включал в себя следующие виды работ: первоначально отбирались пробы загрязненного грунта, из которых в лабораторных условиях выделялись наиболее сильные углеводород разрушающие микроорганизмы. После чего они наращивались. Затем готовился водный раствор, состоящий из микроорганизмов, минеральных удобрений и воды, которым обрабатывались исследуемые территории.

Обработка проводилась поливочной машиной в мае и июле 1992 г. Контроль за динамикой очистки производился по результатам хроматографического анализа проб, отобранных из опорных скважин. Результаты анализов приведены в табл. 2.2.

Фитологический способ санации применялся на участках в районе установок 41, 201/7, 201/8 и 201/18 – опорные скв. 4 (рис. 2.3), 7, 8, 31.

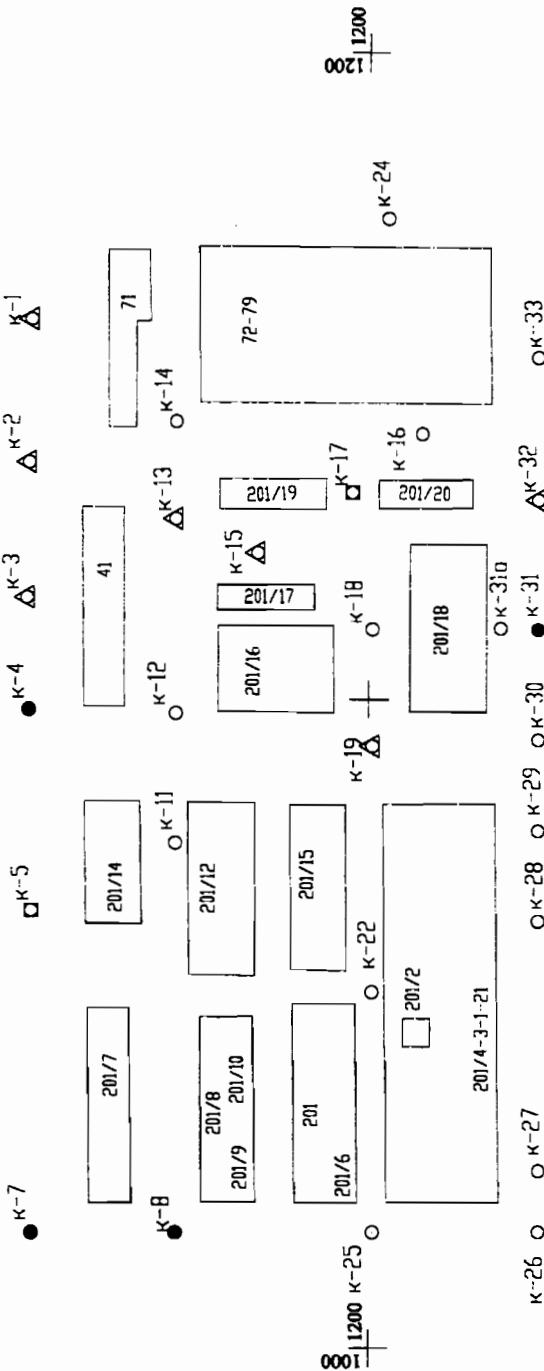


Рис. 2.1. Схема расположения точек опробования на территории цеха № 30 АО "Нефтехимик"

Условные обозначения:

- $\kappa-7$  - номер контрольной точки опробования;
- $\Delta$  - биологическая санация;
- $\square$  - фитотехническая санация;
- - агротехническая санация;



Рис. 2.2. Подготовка территории (опорная скв. 5) к проведению санации агротехническим способом

Таблица 2.1

Технологическая карта очистки грунтов, загрязненных углеводородами, агротехническим способом на территории цеха № 30 АО «Нефтехимик»

Мероприятия	Марка машин и орудий	Площадь, подлежащая обработке, га	Сроки проведения (число, месяц), 1992 г.
Внесение минеральных удобрений NPK 90 кг/га по действующему веществу	РТТ-4.2 и вручную	0,40	1.06; 20.06; 1.06; 19-20.06
Вспашка на глубину 25-30 см	МТЗ-80	0,21	25-30.05
Рыхление на глубину 20 см	Мотоблок	0,19	2.06; 15.06
Внесение микрофлоры (технология внесения приведена при описании второй технологии)	Поливочная машина	0,40	30.05; 17.06
Культивация на глубину 10-12 см с одновременным боронованием	МТЗ-80	0,21	1.06
Рыхление на глубину 10-12 см	Мотоблок	0,18	2.07
Прикатывание	МТЗ-80	0,40	
Контрольный отбор образцов согласно ранее разработанной и уточненной схеме и их анализ	ГЖХ и вручную	0,40	Май, июль, сентябрь

Таблица 2.2

Содержание углеводородов в грунтах  
(май 1992 г. – начало санации, июль 1992 г. – в процессе санации, сентябрь 1992 г. – окончание санации)  
(территория цеха № 30 АО «Нефтехимик»)

Вид очистки	Номер скв.	Дата отбора проб	Глубина отбора проб, м	Содержание углеводородов в грунтах, мг/100 г почвы													
				бензол	толуол	этанол	бензол ксилол	м-п-ксилол	и-ксилол	стирол	и-мас. аль.	масл. аль.	изобут. спирт	бут. спирт	2-этил-гексанол	2-этил-гексаканаль	сумма
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Био-	1	Май	0,0-0,1	0,70	0,55	1,10	0,10	0,08	0,24	0,16	0,23	0,08					4,34
		Июль	0,0-0,1	0,90	0,20	3,00	0,70	0,20	1,20	4,10	0,80	0,30	0,20	0,70	8,10	20,40	
		Сент.	1,10	0,50	2,00	0,50	0,20	1,20	3,80	1,10	0,50	0,20				11,10	
		Май	0,54	0,29	0,90	0,70	10,00	0,70	0,23	0,15	0,21	0,01				13,73	
		Июль	0,1-0,2	0,20	0,10	0,90	0,90	0,30	1,30	0,90	1,00	0,40	0,20	0,90	0,30	12,10	
		Сент.	0,20	0,20	0,40				0,80							1,60	
		Май	0,40	0,20	0,80	0,05	0,08	0,02	0,18	0,10	0,20					2,03	
		Июль	0,2-0,3	0,10	0,10	1,00	2,30	2,70	2,20	0,70	0,70	0,60		0,80		18,10	
		Сент.	0,10	0,20					0,90	0,40						28,60	
		Май	0,30	0,12	0,30	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,08					1,60	
		Июль	0,3-0,5	0,10	0,10	0,50	1,60	1,20	2,10	0,80	0,50					0,91	
		Сент.	0,90	0,50	0,20	0,30	0,10	0,80	0,20	0,60	0,10	0,10				6,30	
Био-	2	Май	0,04	0,15	2,60	0,60	0,20	0,60	1,20		2,30	7,30				29,80	
		Июль	0,1-0,3	1,60	1,90	5,70	1,40	2,10	0,80		1,20	4,20				43,00	
		Сент.	2,10	1,90	9,60	3,20	2,10	0,80			1,10	3,20				3,80	
		Май	0,03	0,09	0,32	0,10	0,09	0,10	1,20		0,20	3,10				14,99	
		Июль	0,5-0,7	7,30	3,60	4,30	3,10	8,20	1,00	8,30	9,50	3,60	11,70	1,20	32,60	94,40	
		Сент.	8,20	4,30	2,90	12,10	8,90	4,60					3,10			44,10	
		Май	0,02	0,05	0,26	0,06	0,02	0,06	0,60		0,30	2,30				3,67	
		Июль	0,7-1,0	11,30	4,10	4,00	2,80	6,10	1,00	6,50	7,10	2,20	5,20	0,08	18,60	68,98	
		Сент.	11,70	9,10	6,00	2,10	3,50	10,90			5,20	0,30	7,50	0,30	56,30		

Продолжение табл. 2.2

Продолжение табл. 2.2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Бюо-	19	Май																
		Июль	0,0-0,1	4	1,4	3,2	1,2	1,4	1,2	0,9	1	0,90	0,3		0,6	0,4	0,00	
		Сент.																16,50
		Май	1,12	1,12	2,00	8,6	5,2	12,30	10	2,50	5,00	3,2		0,9	0,4			0,00
		Июль	0,1-0,2	1	0,6	0,9	0,4	0,5	0,3	0,2	0,3	0,10	0,1		0,12	1,2		52,34
		Сент.																5,72
		Май	4,10	1,11	1,22	1,92	0,9											19,80
		Июль	0,2-0,3	3	0,3	3,7	1,1	1,3	0,1	0,1	0,2	2,20	0,3		0,9	1,3		9,25
		Сент.																14,50
		Май	0,10	1	0,10	0,3	0,5	1,00	0,8									19,00
		Июль	0,3-0,5	7	2,6	5,1	2,6	2	3	1,2	2,8	3,20	0,8		0,2	0,1		6,10
		Сент.																30,30
Бюо-	32	Май	0,3	0,02	0,16													20,60
		Июль	0,0-0,1	0,60	0,7	1,20	0,3	0,1	0,10	0,6	0,20	0,40	0,3		0,4	1,2		0,48
		Сент.		0,1				2,7	0,4	0,1				0,2				3,50
		Май	0,32	0,03	0,18													0,53
		Июль	0,1-0,2	0,4	0,3	0,9	0,1	0,1		0,2	0,1	0,1	0,2		0,1	0,4		2,90
		Сент.		0,10						0,70	0,3	0,10						1,20
		Май	0,1	0,02	0,1					0,05	0,08	0,02			0,01			0,38
		Июль	0,2-0,3	0,5	0,8	1,1	0,3	0,1	0,1	0,5	0,2	0,3	0,3		0,3	0,9		5,40
		Сент.		0,2	0,1					0,7	0,3							1,30
		Май	0,02		0,05													0,07
		Июль	0,3-0,5	0,4	0,7	0,7	0,3		0,1	0,6	0,3	0,2	0,2		0,1	0,1		3,70
		Сент.		0,3	0,5					0,9	0,5							2,20

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
агро-	5	Май	2,20	5,10	5,00	10,00	15,20	18,30	3,80	5,20	6,30	12,30	18,90	18,40	13,20	133,90		
		Июль	0,0-0,1	40,00	39,00	75,00	31,00	41,20	55,00	27,60	16,20	15,30	18,90	22,70	30,20	41,00	453,10	
		Сент.		0,80	0,70	1,00	0,80	0,30			3,00						6,60	
		Май	0,90	2,41	4,58	8,20	12,60	15,20	1,30	1,04	2,00	13,60	18,10	16,20	12,90	109,03		
		Июль	0,1-0,2	8,00	79,00	90,00	63,00	81,30	108,20	52,30	32,40	29,60	35,10	48,00	64,70	91,20	782,80	
		Сент.	1,20	1,90	1,30	1,40	0,90			7,00							13,70	
		Май	0,10	1,52	3,00	2,00	5,60	6,30	0,80	0,10	0,10	4,60	12,60	10,30	7,20	54,22		
		Июль	0,2-0,3	3,20	21,60	19,80	27,10	25,30	31,70	12,60	10,40	12,80	11,70	14,20	21,30	12,40	224,10	
		Сент.	0,40	0,30	0,50	0,90	0,60			6,00							8,70	
		Май	0,02	0,31	1,29	0,80	3,30	2,80	0,10	0,08	0,08	2,10	1,80	3,60	1,32	17,60		
		Июль	0,3-0,5	2,30	19,00	12,40	12,80	10,50	13,60	9,10	3,20	10,60	7,40				100,90	
		Сент.		0,20	0,10	0,20	0,40	0,30			1,20						2,40	
агро-	17	Май	2,3	3,81	2,18	12	15,2	15	13,5	11,3	1,80						77,09	
		Июль	0,0-0,1	0,01	0,1	0,6	1,4	1,2	5,2	3,1	0,3	1		0,1	0,2	13,21		
		Сент.	0,3	0,4	0,2	0,1	0,8	1,2	0,4	0,8							4,20	
		Май	2,40	3,61	2,10	12,4	14,1	15,60	11,8	12,20	1,50						75,71	
		Июль	0,1-0,3	0,08	0,7	0,5	1,6	1,8	5,6	3,5	0,6	2,00		0,3	0,3	16,98		
		Сент.	1,2	0,6	0,2	1,2	1,2	0,8	0,4	0,9							6,50	
		Май	1,60	2,5	1,20	10,8	10,2	12,30	10,8	10,30	1,00		3,1				63,80	
		Июль	0,3-0,5	0,1	0,7	0,6	2	2,3	5	4,2	0,9	4,20		0,5	0,6	21,10		
		Сент.	3,1	0,8	0,4	3,2	2,6	0,8	0,5	1,2				0,5	0,6	14,90		
		Май	1,28	2,04	0,92	8,6	5,4	2,60	7,1	5,30	0,70						33,94	
		Июль	0,5-0,7	0,4	2,8	1,9	6,3	5,8	8,1	7,3	2,2	6,80					41,60	
		Сент.		1,7	0,6	0,1	0,8	0,9	0,9	0,8	0,7	2,8					9,30	
		Май	0,42	0,94	0,03	1,6				1,2	0,31						4,50	
		Июль	0,7-1,0	2,1	0,5	0,3	1,2	1,3	4,2	2,8	0,4	1,60					14,40	
		Сент.		1,9	0,8	0,2	0,2	0,3	1	0,8	1						6,20	

Продолжение табл. 2.2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>Фито-</b>	<b>4</b>	<b>Май</b>	0,22		0,10		0,40											0,72
		<b>Июль</b>	0,0-0,1	0,10	2,60	2,20	1,20	1,60	3,10	0,90	0,10		1,40		1,00		14,20	
		<b>Сент.</b>	0,80	0,60	0,90	1,20	1,60	0,90	0,90	0,60	1,10						7,70	
		<b>Май</b>	0,27					0,18									0,65	
		<b>Июль</b>	0,1-0,3	8,00	6,20	9,20	6,20	1,80	8,10	2,40	0,80		3,80		3,20		49,70	
		<b>Сент.</b>	1,20	0,30	0,40	1,80	1,20	0,70	1,20	0,90	0,10		0,20				8,00	
		<b>Май</b>	0,29					0,32									0,61	
		<b>Июль</b>	0,3-0,5	9,10	7,60	5,90	7,10	1,00	7,10	3,90	0,40		5,80				47,90	
		<b>Сент.</b>	0,20	0,10	0,30	2,00	0,80	0,30	1,20	0,40	0,40		0,70				6,00	
		<b>Май</b>	0,30	0,10	0,20		0,20	0,10									0,90	
		<b>Июль</b>	0,5-0,7	8,80	6,30	2,90	8,40	0,90	5,00	5,70	0,40		4,60				43,00	
		<b>Сент.</b>	3,20	1,30	0,70	3,00	1,00	0,90	1,70	2,80		0,40					15,00	
		<b>Май</b>	0,20	0,30	0,10												0,60	
		<b>Июль</b>	0,7-1,0	3,20	3,80	1,00	3,40	0,50	3,00	2,90	0,20		1,80				19,80	
		<b>Сент.</b>	3,40	1,60	0,70	2,80	0,90	2,40	1,50	2,20		0,30					15,80	
<b>Фито-</b>	<b>7</b>	<b>Май</b>	0,10	0,08			0,02	0,30									0,50	
		<b>Июль</b>	0,0-0,1	0,80	1,20	3,20	4,00	3,10	3,00	2,10	0,90	1,20	1,80				21,30	
		<b>Сент.</b>	1,30	2,70	7,20	6,30	4,10	1,30	6,10	6,90	0,10						36,00	
		<b>Май</b>	0,10	0,05	0,10	0,40	0,30	0,40	0,40	0,30	0,70	0,20	0,20				0,10	
		<b>Июль</b>	0,1-0,2														3,05	
		<b>Сент.</b>	6,30	4,10	7,80	2,30	2,40	0,90	2,30	5,70		0,20					32,00	
		<b>Май</b>	0,20		0,10												0,30	
		<b>Июль</b>	0,2-0,3	0,06	0,20	0,10	0,20	0,30	0,20	0,10	0,04	0,10	0,10				1,40	
		<b>Сент.</b>	5,60	8,20	6,80	9,70	9,70	6,10	1,20	7,20	6,80						61,30	
		<b>Май</b>	0,80		0,02												0,82	
		<b>Июль</b>	0,3-0,5	0,02	0,10	0,07	0,10	0,15	0,10	0,07	0,10	0,07	0,20				0,98	
		<b>Сент.</b>	4,20	3,10	2,80	2,40	1,80	0,50	3,10	3,10							21,00	

Окончание табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Фито-	8	Май	0,57	0,73	1,90	0,30	0,11	1,60									5,21
		Июль	0,0-0,1	2,40	2,80	1,70	1,30	1,10	2,60	2,10	2,10					6,90	23,00
		Сент.		1,20	0,80	1,60	2,40	0,70	3,00							9,70	
		Май	0,6	0,8	1,8	0,3	0,1	1,12								4,72	
		Июль	0,1-0,2	0,2	0,1	0,09	0,1	0,1	0,3	0,09	0,3					1,28	
		Сент.	1,9	1,2	2,1	3,2	1	0,9								10,30	
		Май	0,39	0,61	0,9	0,1	0,09	0,76								2,85	
		Июль	0,2-0,3	1,2	1,6	0,7	0,8	0,6	1,3	0,8	0,7					7,70	
		Сент.		0,30	0,9	0,90	0,5	0,5	0,30							2,90	
		Май	0,12	0,24	0,24	0,03	0,03									0,39	
		Июль	0,3-0,5	0,70	0,9	0,30	0,05	0,2	0,70	0,5	0,60					3,95	
		Сент.		0,2	1,1	0,6	0,8	0,8								2,70	
Фито-	31	Май	0,03	0,08		0,1										0,21	
		Июль	0,0-0,1	0,3	1,2	1	1,3	1,2	1,3	0,3	0,4	0,10	0,2			7,30	
		Сент.														0,00	
		Май	2,10	0,04	0,50	1	0,8	0,60	2,6							8,44	
		Июль	0,1-0,2	7	9,2	8	4,2	4,6	6,1	3,2	4,5	3,10	0,8	0,6	12	63,30	
		Сент.	3,5	4,1	3,9	4,1	3,9	1,2	0,9	0,9	1	0,1	0,5	0,1	1	25,20	
		Май	0,80	1,5	0,20	0,5	1,2		1,2	7,2		1	0,2			12,60	
		Июль	0,3-0,5	3	2,8	3,1	2	3,1	2,1	1,6	2	1,20	0,2			21,10	
		Сент.		2,8	2,6	1,8	2,7	1,6	1,4	1,6	0,3	0,7	0,1			15,60	
		Май	0,09	0,6	0,02	0,1				1,3						2,11	
		Июль	0,5-0,7	0,8	0,3	0,6	0,1	0,2	0,3	0,12	0,3	0,09	0,1			2,91	
		Сент.		0,2	0,3	0,2	0,5	0,4	1,3	0,8	0,1	0,3	0,1			4,20	
		Май	0,03			0,02				0,3						0,35	
		Июль	0,7-1,0	0,2	0,8	0,2	0,8	2,1	0,1	1,3	1,30	0,4				8,40	
		Сент.		0,3	0,4	0,4	0,7	0,4	1,1	0,9	0,2	0,1				4,50	



**Рис. 2.3. Подготовка территории (опорная скв. 4) к проведению санации фитологическим способом**

В технологическом плане работы осуществлялись следующим образом: первоначально вспашка участков на глубину 25-30 см, боронование, после чего внесение удобрений NPK в расчете 100 кг/га по действующему веществу и посев трав – овес, ячмень. Полив производился в июне и июле.

Степень очистки определялась по результатам хроматографических анализов проб грунта (см. табл.2.2).

Таким образом, на исследуемой территории опробованы три технологии очистки грунтов, загрязненных углеводородами. Данные об эффективности технологий санации приводятся ниже.

## **2.2. Изучение особенностей распределения углеводородов в процессе санации**

На основании полученной информации (см. табл. 2.2) построена карта распределения загрязняющих веществ в грунтах на исследуемой территории в слое грунта до 0,1 м (рис. 2.4). По карте видно, что ареолы загрязнения приурочены к скв. 5 и 15, а на остальной территории уровень загрязнения значительно ниже.

Рассмотрим динамику очистки грунтов по применяемым технологиям.

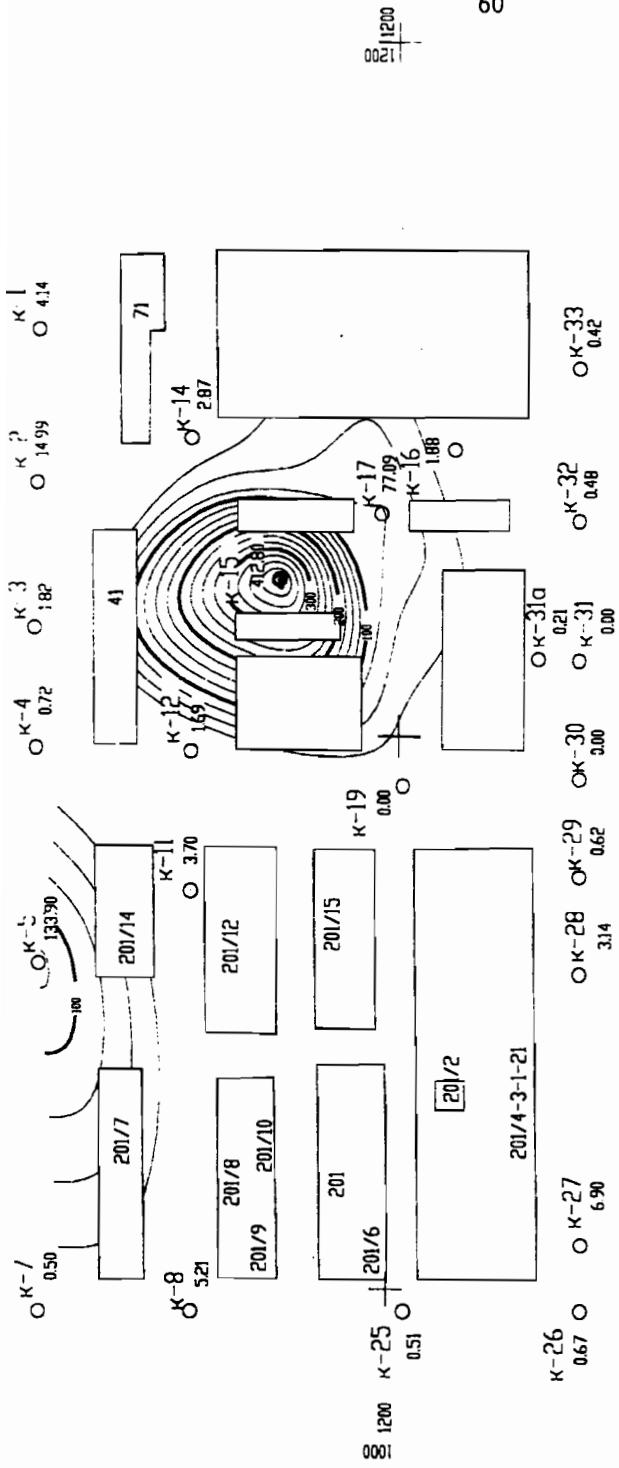


Рис. 2.4. Карта распределения загрязняющих веществ в грунтах на территориях цеха № 30 АО "Нефтехимик"  
до производства работ по санации грунтов на глубине до 0,1 м

Условные обозначения:

## 2.2.1. Агротехнический способ очистки

В процессе проведения агротехнических мероприятий установлено, что на исследуемой территории в районе установки 201/14 (опорная скважина 5) с мая по сентябрь повсеместно наблюдаются снижения концентраций углеводородов, загрязняющих грунт. Так, в слое грунта до 0,2 м первоначальное загрязнение составляло 133,9 мг/100 г почвы (май), в процессе очистки оно снизилось до 6,6 мг/100 г почвы (сентябрь), т.е. степень очистки составила 95%. Следует отметить, что в июне на эту территорию произошел выброс смолы пиролиза, т.е. участок подвергся вторичному загрязнению, о чем свидетельствует высокое содержание углеводородов в пробах грунта (453,1 мг/100 г почвы). На рис. 2.5 приведена диаграмма изменения содержания углеводородов в грунтах в процессе их очистки. По рисунку видно, что даже при достаточно значительном вторичном загрязнении грунтов углеводородами с помощью агротехнических мероприятий грунты эффективно санируются. Так, в слое 0,0-0,1 м степень очистки составила 95%, в слое 0,1-0,2 м – 87,5%, в слое 0,2-0,3 м – 84% и слое 0,3-0,5 м – 86,4%.

На территории между установками 201/19 и 201/20 (скв. 17) также наблюдается снижение уровня загрязнения в грунтах (рис. 2.6). По рис. 2.6 видно, что в мае (до санации) содержание углеводородов в грунтах закономерно уменьшается с увеличением глубины. При санации грунтов (июль, сентябрь) выявлен другой вид распределения углеводородов: с глубины 0,5-0,7 м наблюдается закономерное увеличение содержания углеводородов в грунтах, а далее – их уменьшение. Это связано, вероятно, с тем, что до глубины 0,5 м процесс санации идет достаточно эффективно, накопление же углеводородов в зоне 0,5-0,7 м связано с вторичным загрязнением за счет порового поднятия углеводородов с нижележащих слоев грунта, т.е. происходит санация всей толщи. На рис. 2.7 показана поверхность территории до санации, на рис. 2.8 – после санации. По рисункам видно, что после применения агротехнического способа очистки произошло самовосстановление травяного покрова.

Таким образом, санация грунтов проводится с помощью простейших агротехнических мероприятий – рыхления, внесения удобрений и т.д., создания в приповерхностной зоне благоприятных условий для улучшения физико-химических процессов (испарение, ультрафиолетовое облучение, окисление углеводородов) и микробиологического разрушения. Это позволяет снизить уровень первоначального загрязнения грунтов на 85-95%. Однако за счет капиллярного поднятия происходит вторичное загрязнение приповерхностной части массива, в то же время нижняя часть массива очищается. Следовательно, при значительном загрязнении территории процесс санации должен протекать достаточно долго.

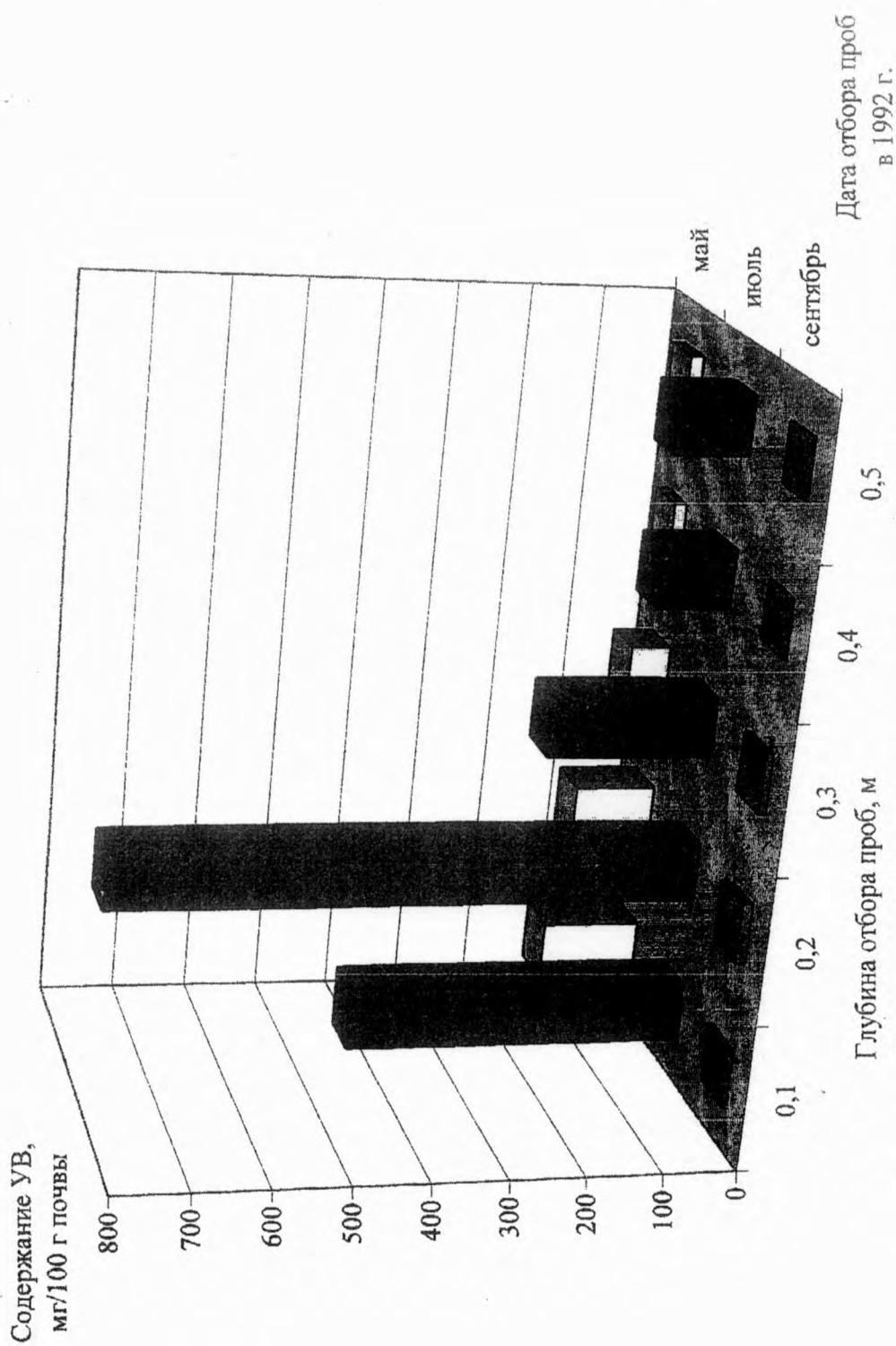


Рис. 2.5. Изменение содержания углеводородов в грунтах в процессе их очистки агротехническим способом по скважине 5

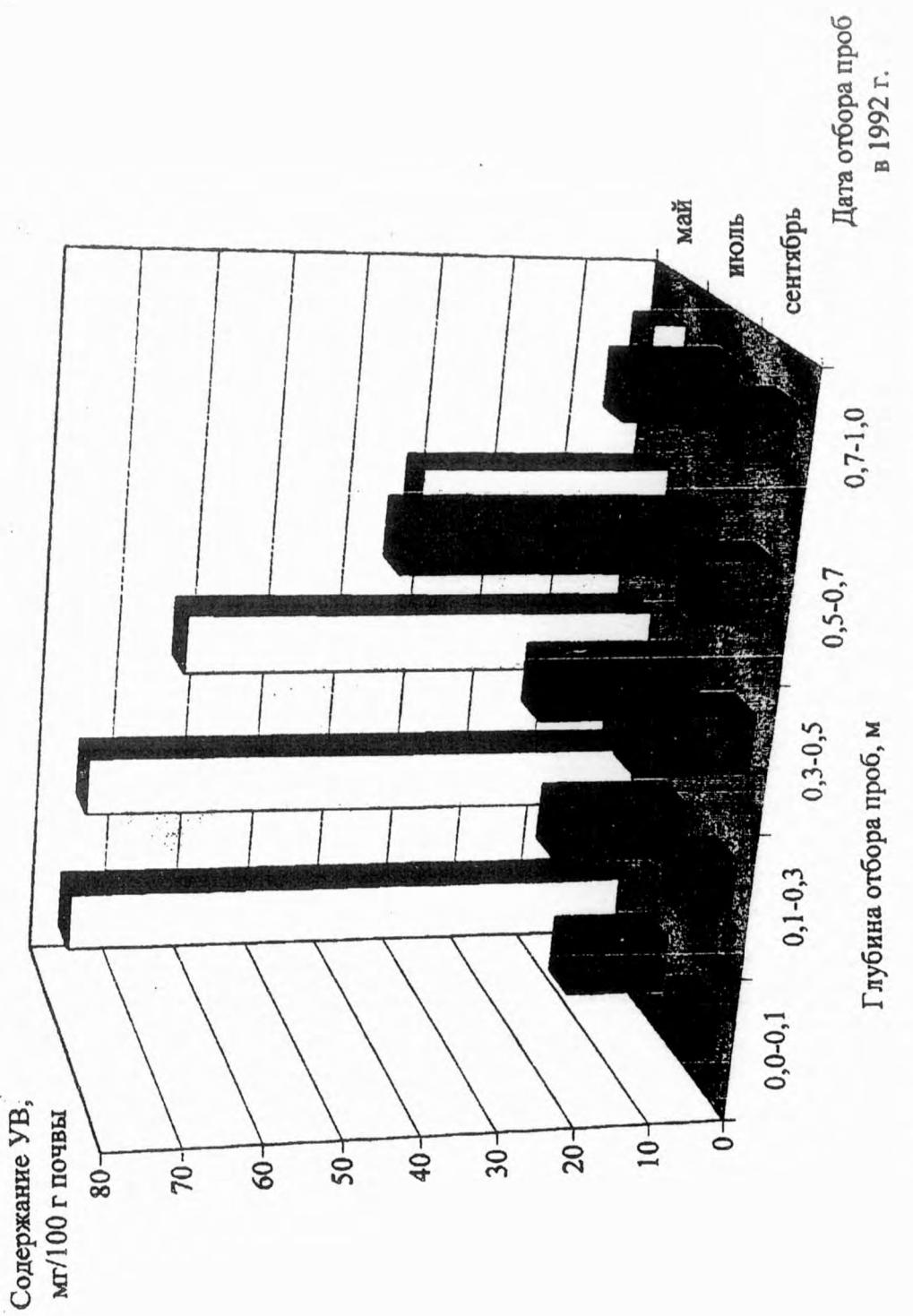


Рис. 2.6. Изменение содержания углеводородов в грунтах в процессе их очистки агротехническим способом по скважине 17



Рис. 2.7. Территория до проведения санации агротехническим способом

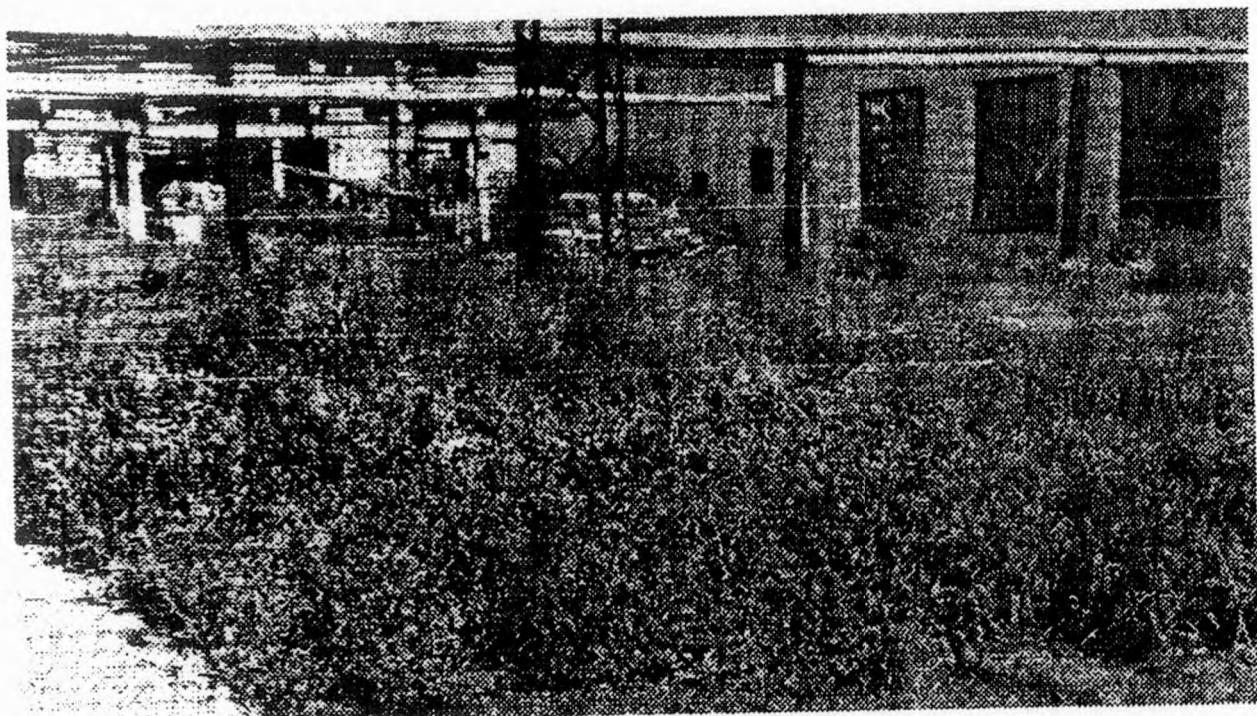


Рис. 2.8. Территория после проведения санации агротехническим способом

На основании полученной информации можно сделать следующий вывод: при первоначальном уровне загрязнения до 133,9 мг/100 г почвы и при вторичном загрязнении до 782,8 мг/100 г почвы агротехнические мероприятия позволяют снизить уровень загрязнения за 4-5 месяцев на 84-95%.

## 2.2.2. Микробиологический способ очистки

Анализ результатов исследований показывает, что при достаточно высоком уровне первоначального загрязнения грунтов скв. 15 – 412,8 мг/100 г почвы (слой 0,0-0,1 м) степень очистки составляет 95–98%. Диаграмма изменения содержания углеводородов в грунтах приведена на рис. 2.9. При незначительном первоначальном уровне загрязнения грунтов до 10 мг/100 г почвы повсеместно наблюдается вторичное загрязнение грунтов за счет капиллярного поднятия углеводородов из нижележащих слоев. Причем после двух первых месяцев очистки (в июле) наблюдается максимальное вторичное загрязнение, затем содержание углеводородов в грунтах снижается (рис. 2.10). Так, в скважине 32 в слое 0,0-0,1 м уровень первоначального загрязнения – 0,48 мг/100 г почвы (май), вторичного (июль) – 6,1 мг/100 г почвы и по окончании санации (сентябрь) – 3,5 мг/100 г почвы. По сравнению с первоначальным загрязнением (май) вторичное (июль) увеличилось в 2,7 раза и по окончании санации (сентябрь) – в 7,3 раза. По отношению к вторично-му загрязнению (июль) степень очистки (сентябрь) составила 43% в слое 0,0-0,1 м, 58% в слое 0,1-0,2 м, 76% в слое 0,2-0,3 м и 40% в слое 0,3-0,5 м (см. табл. 2.2).

Из этого следует, что микробиологический способ очистки (совместно с рыхлением) при уровнях первоначального загрязнения 412,8 мг/100 г почвы (скважина 15) работает достаточно эффективно – степень очистки составляет 95-98%, при первоначальных уровнях загрязнения до 10 мг/100 г почвы, его эффективность резко снижается, так как скорость деструкции углеводородов в верхнем слое грунта меньше скорости «подсоса» УВ из нижних слоев массива, т.е. происходит вторичное загрязнение, хотя в целом идет очистка массива пород.

На территорию скважины 3 в августе произошел выброс, поэтому при вторичном загрязнении увеличилось содержание УВ в грунтах в слое 0,0-0,1 м в 207 раз, в слое 0,1-0,2 м в 331 раз, в слое 0,2-0,3 м в 250 раз и в слое 0,5-0,7 м в 300 раз. Диаграмма изменения содержания углеводородов в грунтах приведена на рис. 2.11. Из приведенного видно, что эффективность микробиологического способа санации грунтов на исследуемой территории ниже, чем агротехнического способа.

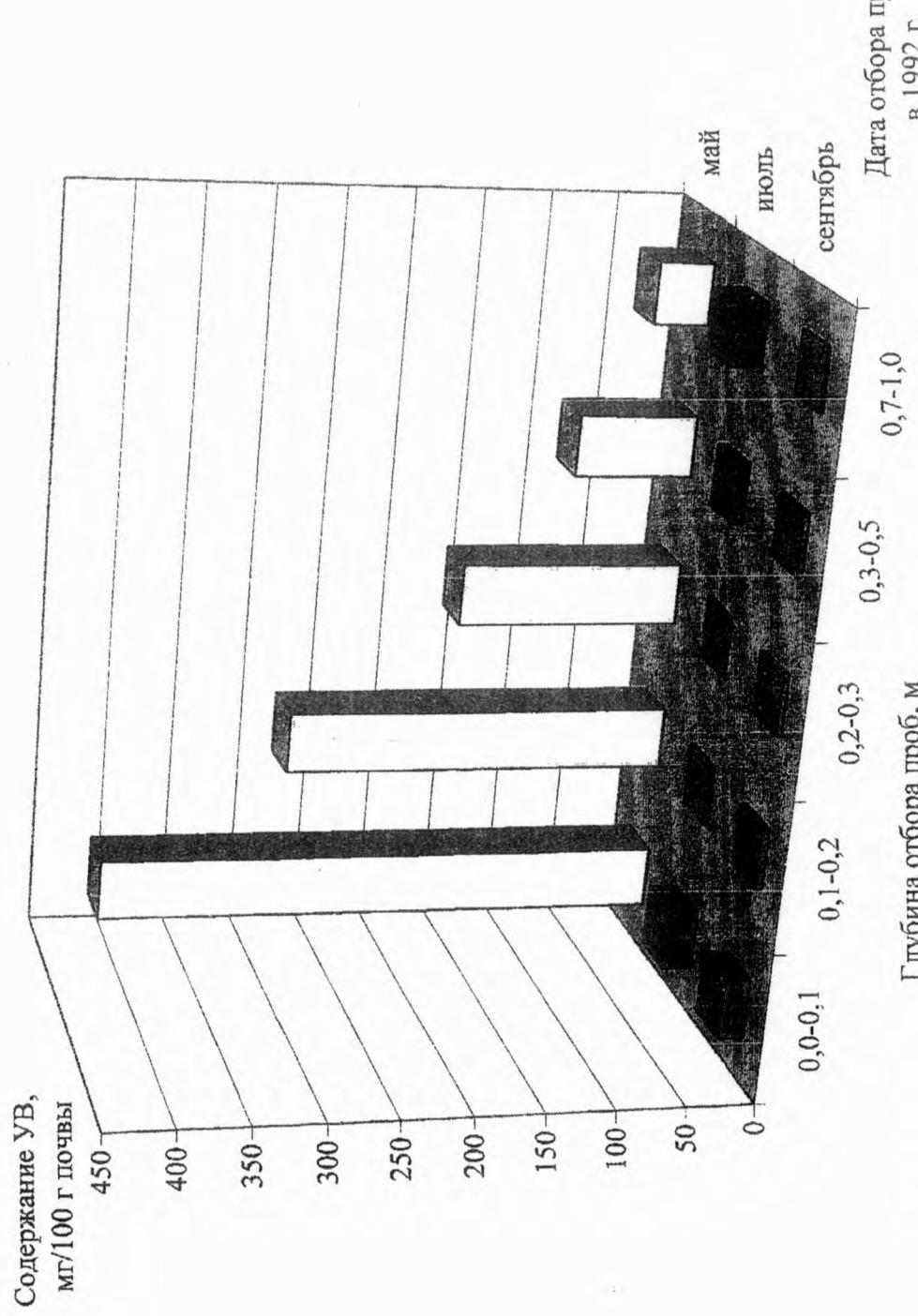


Рис. 2.9. Изменение содержания углеводородов в грунтах в процессе их очистки микробиологическим способом по скважине 15  
в 1992 г.

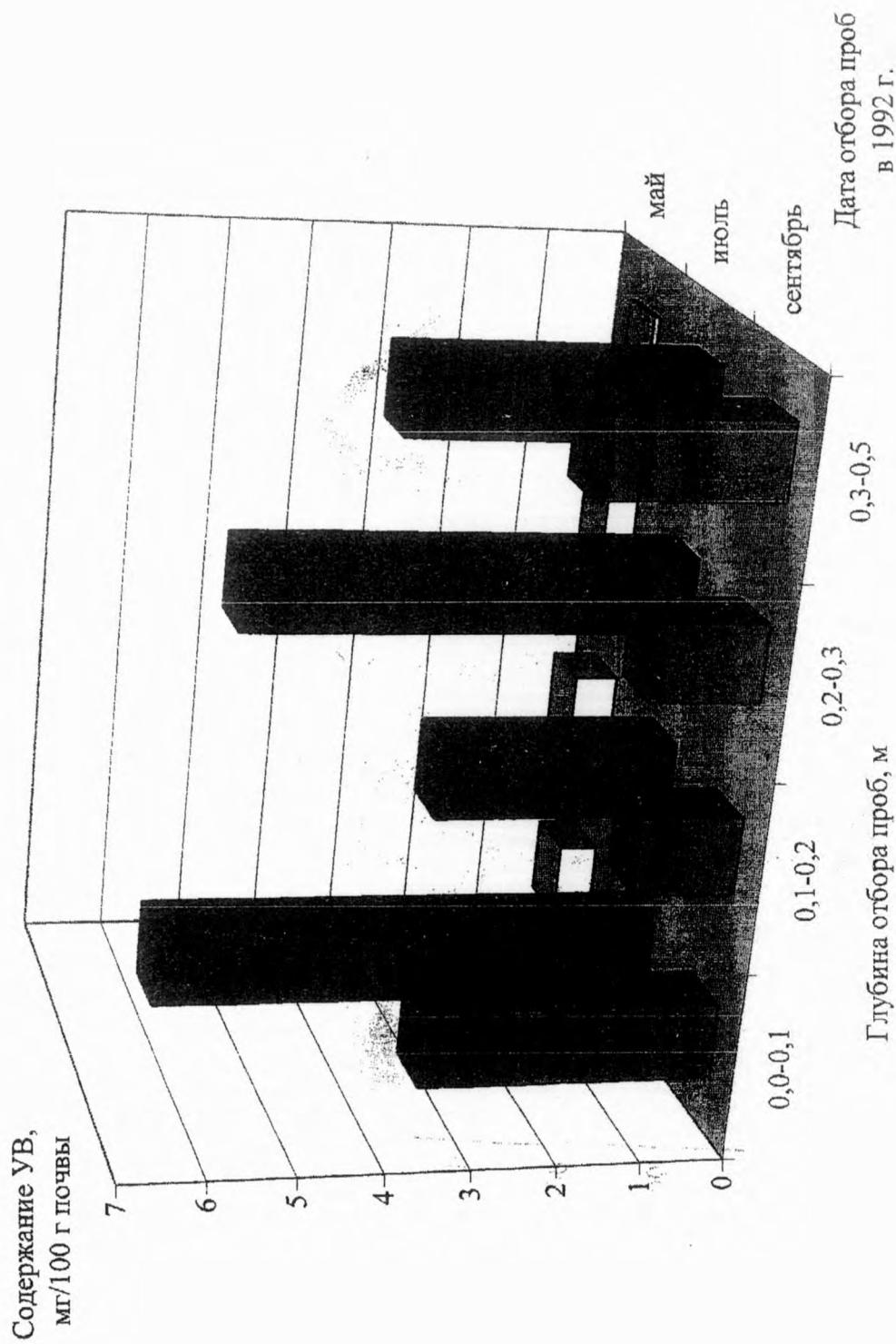
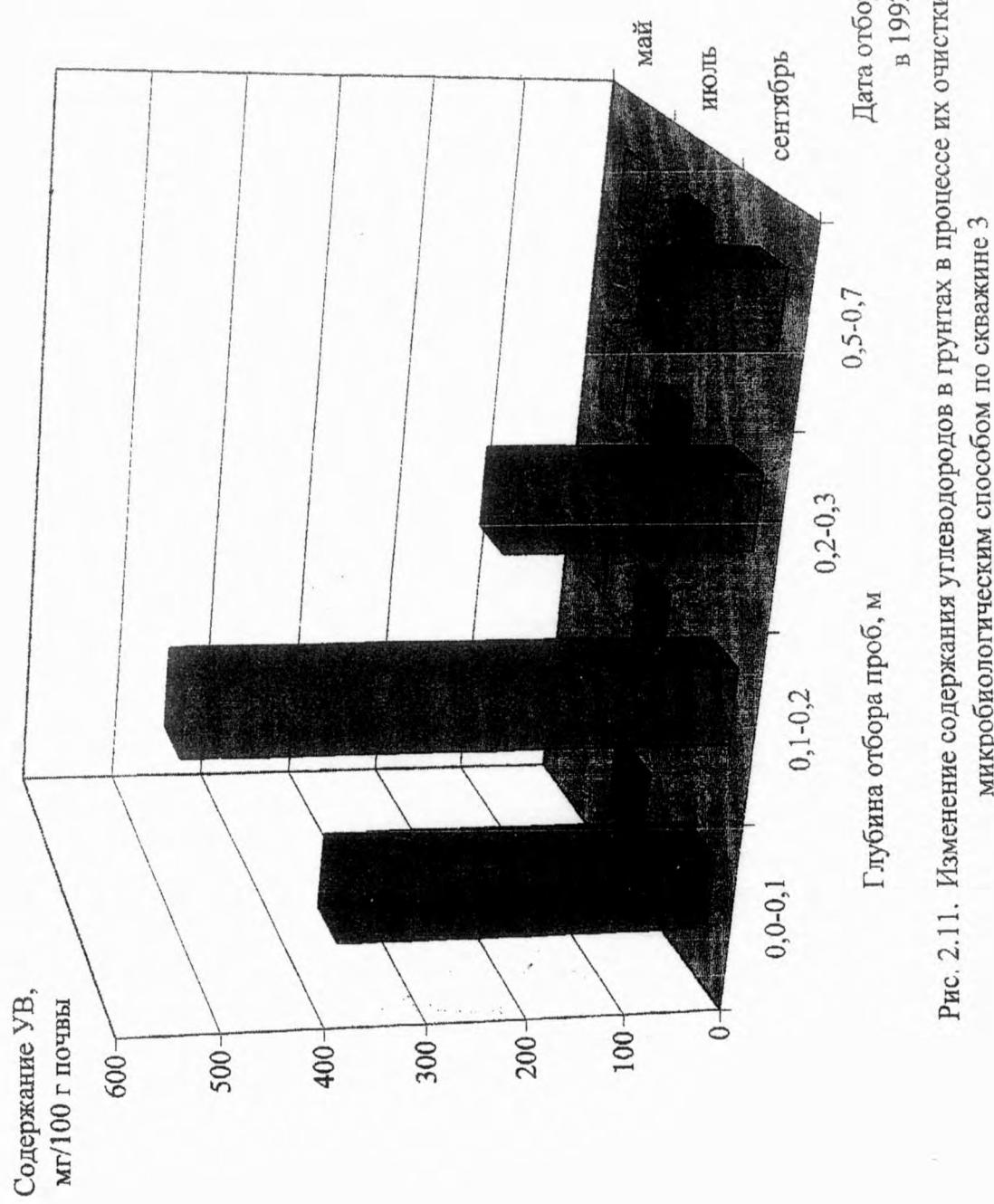


Рис. 2.10. Изменение содержания углеводородов в грунтах в процессе их очистки микробиологическим способом по скважине 32



### 2.2.3. Фитологический способ очистки

Анализ механизма изменения содержания углеводородов в грунтах в процессе их очистки фитологическим способом (см. табл. 2.2) показывает, что при первоначальном уровне загрязнения до 5,21 мг/100 г почвы (скв. 8) практически во всех случаях происходит вторичное загрязнение грунтов вплоть до 63,3 мг/100 г почвы (скв. 31) и затем по отношению к вторичному загрязнению их очистка (рис. 2.12, 2.13). Так, в скважине 4 (рис. 2.14), в слое 0,0-0,1 м, увеличилось содержание углеводородов (июль) по отношению к первичному загрязнению (май) в 20 раз, а степень очистки (сентябрь) по отношению к вторичному загрязнению (июль) составила 46%, в слое 0,1-0,3 м соответственно увеличение в 76 раз и очистка 84%, в слое 0,3-0,5 м – в 78 раз и 83%, в слое 0,5-0,7 м – в 48 раз и 65%, в слое 0,7-1,0 м – в 33 раза и 20%.

Вторичное загрязнение грунтов связано, вероятно, не только с поднятием углеводородов посредством капиллярного давления с нижележащих слоев массива, но и с производственным циклом.

Фитологический способ очистки, испытанный на территориях с «небольшим содержанием углеводородов в грунтах», показал, что процесс очистки длителен во времени и скорость деградации углеводородов ниже скорости вторичного загрязнения.

Анализ особенностей распределения углеводородов по исследуемой территории показал, что ареолы загрязнения приурочены к скважинам 5 и 15. Поэтому на участке, расположенном между установками 201/17 и 201/19 (контрольная скважина 15), было запланировано в 1992 г. провести испытание микробиологического способа санации грунтов (с рыхлением) и в 1993 г. продолжить испытания по исследованию эффективности технологии самоочистки грунтов. Результаты исследований приведены в табл. 2.2. Анализ результатов показывает, что через год после исследований эффективность санации снижается. Так, в слое 0,0-0,1 м в сентябре 1992 г. степень очистки грунтов составляла 95,4%, а июне 1993 г. – 96,9%. Это говорит о том, что очистка грунтов до уровня загрязнения 10-20 мг/100 г почвы идет достаточно быстро (5-6 месяцев), в дальнейшем время очистки грунтов до ПДК достаточно длительно (несколько лет, а может и десятилетий). Кроме того, на глубине 0,7-1,0 м четко прослеживается вторичное накопление углеводородов.

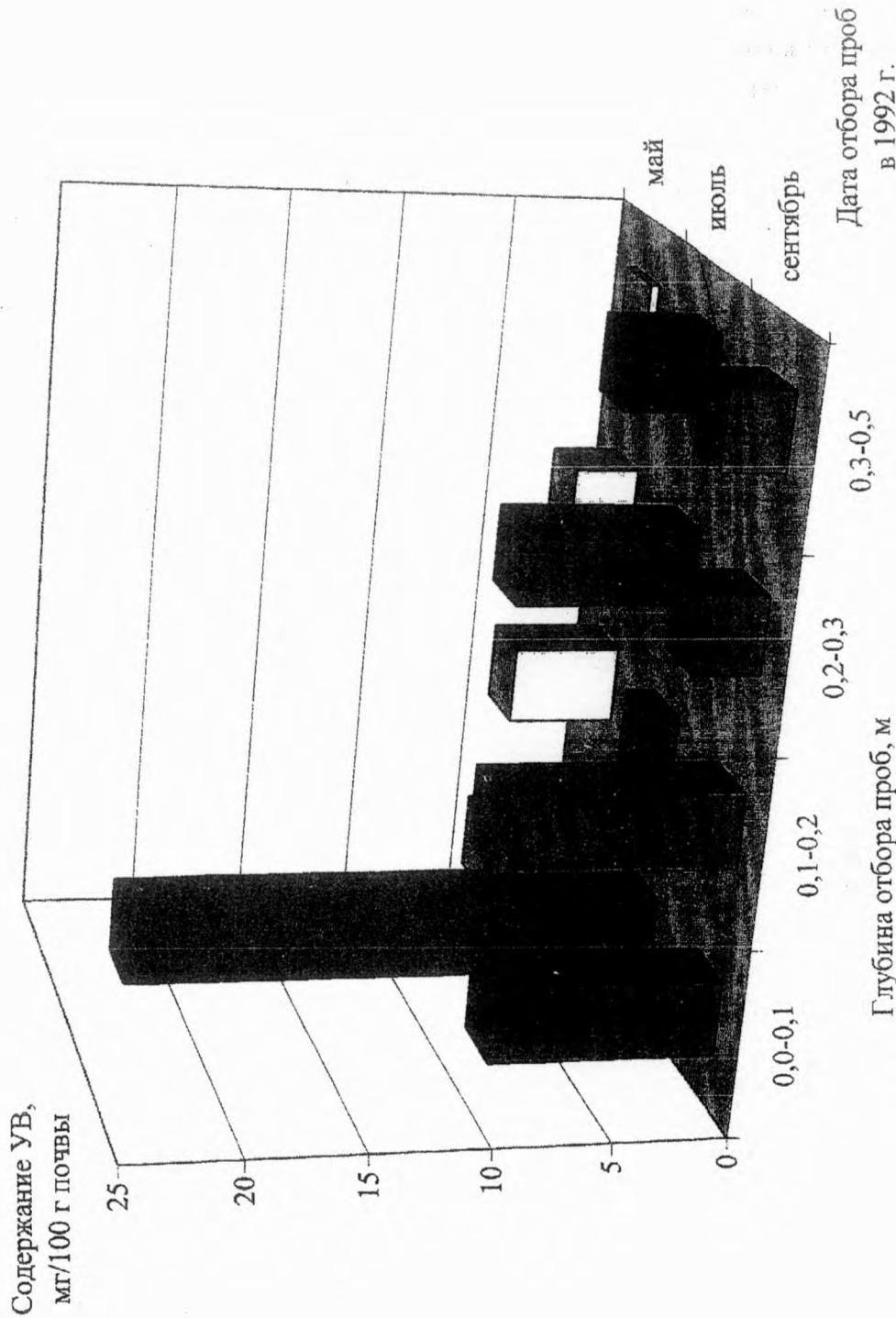


Рис. 2.12. Изменение содержания углеводородов в грунтах в процессе их очистки фитологическим способом по скважине 8

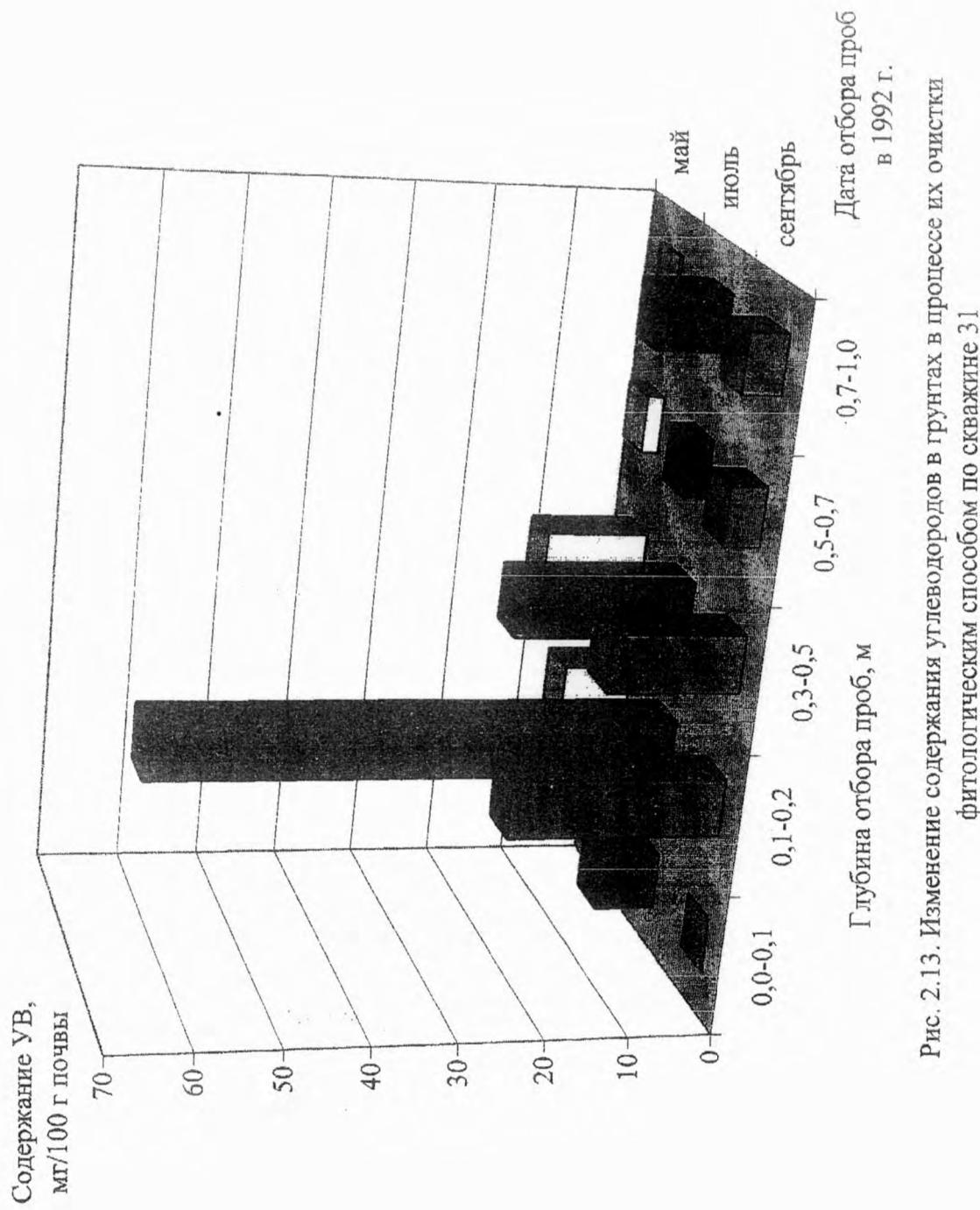
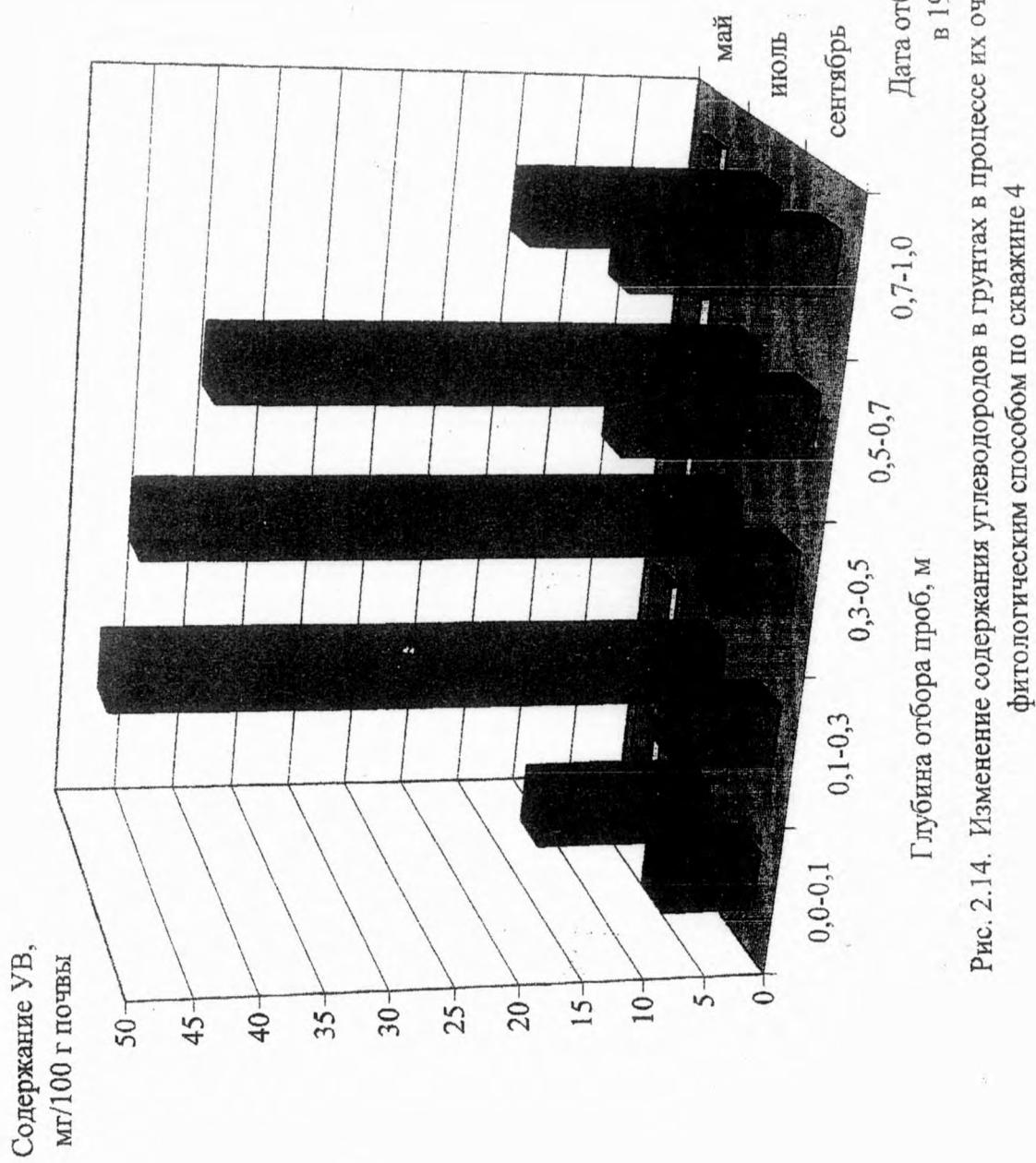


Рис. 2.13. Изменение содержания углеводородов в грунтах в процессе их очистки фитологическим способом по скважине 31



## 2.3. Построение вероятностно-статистических моделей санации

В работе [18] установлена закономерность распределения УВ по разрезу. С увеличением глубины содержание углеводородов в почвах в основном уменьшается. Характер данного распределения по показателю суммарных концентраций углеводородов подтверждается с частотой 0,91. После проведения первой стадии санации установленная особенность ослабевает, частота ее составляет 0,58. После выполнения второй стадии санации частота также составляет 0,58. С целью анализа полученных результатов рассмотрим распределение углеводородов по глубине в двух вариантах: когда содержание УВ в почвогрунтах уменьшается с глубиной и когда такого уменьшения не наблюдается.

В первом случае средняя суммарная концентрация УВ составляет 33,2 мг /100 г почвы, коэффициент корреляции между глубиной и суммарной концентрацией УВ  $r = -0,65$ . Во втором случае, когда содержание УВ в почвогрунтах не уменьшается с глубиной, средняя суммарная концентрация УВ составляет 0,36 мг /100 г почвы при  $r = 0,83$ .

После проведения первой стадии санации средняя суммарная концентрация УВ в почвогрунтах равна 67,9 мг /100 г почвы и  $r = -0,39$  для первого из рассматриваемых вариантов и 25,7 мг /100 г почвы и  $r = 0,55$  – для второго.

После проведения второй санации для первого варианта средняя суммарная концентрация УВ в почвогрунтах равна 64,6 мг /100 г почвы,  $r = -0,50$  и для второго – 13,9 мг /100 г почвы,  $r = 0,27$ .

Отсюда видно, что по средним значениям объективно оценить процессы санации не представляется возможным, поэтому рассмотрим, как протекают эти процессы по каждой из рассматриваемых скважин. Причем более детально по скв. 15, 17, где процессы санации протекали достаточно эффективно, и по скв. 3, где эффективность очистки была очень низкой.

### *Описание результатов по скв. 15.*

Наиболее представительные данные по изменению содержания углеводородов в процессе очистки микробиологическим способом были получены по скв. 15. Исследования были более длительные, чем по другим скважинам, пробы грунтов на углеводородный анализ отбирались с глубин от 0 до 1 м.

Из табл. 2.2 видно, что содержание в почвогрунтах бензола, толуола, этилбензола, метапарааксилола, ортоаксилола и стирола до очистки значительно больше, чем после очистки на всех этапах эксперимента.

Изомасляный альдегид и масляный альдегид присутствуют в почвогрунтах до очистки и после первого и второго этапов очистки в незначительных количествах. Бутиловый спирт присутствует только в одной про-

бе, а 2-этилгексанол и 2-этилгексаналь только в пробах до очистки. Рассмотрим в сравнении наблюдаемые содержания УВ до очистки и затем в процессе санации. Анализ распределения суммарного содержания УВ, а также отдельных органических соединений показывает, что среднее содержание до санации значительно выше, чем после санации (табл. 2.3). В качестве критерия санации авторами используется отношение средних содержаний УВ до санации к содержанию их в процессе санации. Это отношение по суммарному содержанию УВ изменяется от 0,93 до 16,9, для конкретных соединений от 0,44 до 38,81, при этом минимальные отношения характерны для бензола и толуола.

Анализ табл. 2.3 показывает, что углеводородов достаточно много в пробах, отобранных из верхней части отложений, а затем по мере увеличения глубин отбора количество их (УВ) закономерно снижается. Данные тенденции наблюдаются по суммарному содержанию УВ, а также по бензолу, толуолу, этилбензолу, метапарацисилолу, ортокисилолу, стиролу, изомасляному альдегиду, масляному альдегиду, изобутиловому спирту. Для количественной оценки данного явления определим корреляционные связи между содержанием УВ и глубиной отбора проб. Результаты расчетов приведены в табл. 2.4, из которых видно, что коэффициенты корреляции до санации изменяются от -0,94 до -0,66, то есть корреляционные связи во всех случаях отрицательные. Это показывает, что распределение УВ по разрезу скв. 15 до санации с глубиной уменьшается.

Кроме этого, если рассмотреть распределение УВ в интервале 0-0,5 м, то видно, что эти связи значительно усиливаются, например, по суммарному содержанию коэффициент корреляции составляет -0,98. Это свидетельствует о том, что процессы аккумуляции углеводородов по разрезу до 0,5 м имеют практически завершенный характер, тогда как на больших глубинах эти процессы, вероятно, происходят и в настоящее время (не установившийся процесс). Аналогичное усиление корреляционных связей наблюдается и по содержанию отдельных компонентов. Если проанализировать эти коэффициенты корреляции в процессе санации, то они изменяются значительно – от +0,94 до -0,62, т.е. связи различны.

Также нами проанализировано отношение концентраций УВ до санации к концентрациям после санации на различных уровнях разреза грунтов. Из табл. 2.5 видно, что наиболее интенсивно процессы санации протекают до глубины 0,5 м, на глубинах 0,7-1,0 м отношение достаточно часто меньше 1, что можно объяснить тем, что первоначально на этих отметках концентрации углеводородов были незначительны.

Таблица 2.3

Некоторые статистические характеристики содержания углеводородов в процессе санации биологическим (скв. 1, 2, 3, 15, 19, 32), агротехническим (скв. 5, 17) и фитологическим (скв. 4, 7, 8, 31) методом очистки

№ п/п	Изучаемый показатель	Санация № 1		Санация № 2		Санация № 3		Санация № 19		Санация № 32	
		Санация № 1	Санация № 2	Санация № 3	Санация № 19	Санация № 15	Санация № 19	Санация № 15	Санация № 19	Санация № 32	Санация № 32
<b>Суммарное содержание</b>											
1	Май 1992 До санации	5,25	7,96	1,21	195,45	16,92	0,36				
	Июль 1992 После санации	27,87	0,18	50,76	0,15	9,93	0,12	11,67	16,9	1,01	4,52
	Сент. 1992 санирование	4,52	6,16	41,46	1,22	321,0	0,03	6,58	1,77	14,86	2,05
	Июль 1993							7,02	0,93		22,20
<b>Бензол</b>											
2	Май 1992 До санации	0,48	0,03		0,08	7,96		1,33		0,18	
	Июль 1992 После санации	0,32	1,5	6,73	0,04	0,08	1,00	1,03	7,73	0,35	0,47
	Сент. 1992 санирование	0,57	0,56	7,33	0,91	45,25	0,001	1,04	0,99	4,02	0,17
	Июль 1993							0,62	1,44		2,76
<b>Толуол</b>											
3	Май 1992 До санации	0,29		0,09	0,37	11,36			0,80	0,02	
	Июль 1992 После санации	0,12	2,41	3,20	0,03	0,08	4,62	1,36	8,35	1,15	0,62
	Сент. 1992 санирование	0,35	0,34	5,10	0,62	41,05	0,002	1,68	0,81	2,30	0,5
	Июль 1993							1,28	1,31		0,15
<b>Этилбензол</b>											
4	Май 1992 До санации	0,77		1,06	0,21	22,98			0,83	0,12	
	Июль 1992 После санации	1,35	0,57	4,66	0,23	0,37	0,13	1,42	16,28	3,22	0,79
	Сент. 1992 санирование	8,9	1,5	6,16	0,75	41,10	0,02	0,50	2,84	2,12	1,51
	Июль 1993							1,12	0,44		0,00
<b>Метилбензол</b>											
5	Май 1992 До санации	0,46		0,25		0,12		22,54	2,70		0,00
	Июль 1992 После санации	1,37	0,33	2,43	0,10	0,20	0,6	2,36	13,29	1,32	0,25
	Сент. 1992 санирование	0,20	6,85	5,80	0,41	34,90	0,005	0,90	2,62	1,32	1,0
	Июль 1993								1,84	0,49	

Продолжение табл. 2.3

Продолжение табл.2.3

Окончание табл.2.3

№ п/п	Изучаемый показатель	Санация № 5		Санация № 7		Санация № 9		Санация № 11	
		Период	Санация № 5	Период	Санация № 7	Период	Санация № 9	Период	Санация № 11
6	<u>Органический</u>	Май 1992	До санации	9,17	8,98	0,26	0,005	0,42	
		Июль 1992	39,57	0,23	2,48	3,62	0,22	0,98	0,50
		Сент. 1992	После санации	0,52	76,09	1,16	2,13	1,10	0,005
		Июль 1993							
7	<u>Стекло</u>	Май 1992	До санации	10,65	9,10	0,02	0,07	0,07	0,12
		Июль 1992		52,07	0,20	5,62	1,62	0,04	0,92
		Сент. 1992	После санации	0,00	-	0,94	5,76	1,04	0,07
		Июль 1993							
8	<u>Иломасляный альдегид</u>	Май 1992	До санации	1,50	8,98	0,00	0,00	0,87	2,28
		Июль 1992		22,45	0,06	4,18	2,12	3,16	0,73
		Сент. 1992	После санации	0,00	-	0,38	7,20	1,24	0,62
		Июль 1993							
		Май 1992	<u>Бутыловый спирт</u>	1,60					
9	<u>Изобутиловый спирт</u>	Май 1992	До санации	15,55	0,10				
		Июль 1992		4,30	3,61				
		Сент. 1992							
		Июль 1993							
10	<u>Глицерин</u>	Май 1992	До санации	2,12	1,00			1,16	
		Июль 1992		17,07	0,12	3,12	0,32	1,48	0,33
		Сент. 1992	После санации	0,00	-	0,80	3,90	0,30	11,60
		Июль 1993							

Таблица 2.4

Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии между содержанием УВ и глубиной в процессе санации биологическим (скв. 1, 2, 3, 15, 19, 32), агротехническим (скв. 5, 17) и фитологическим (скв. 4, 7, 8, 31) методом очистки

№ ш/п	Изучаемый показатель	Скаажина № 1						Скаажина № 2						Скаажина № 3					
		Уравнение регрессии			Уравнение регрессии			Уравнение регрессии			Уравнение регрессии			Уравнение регрессии			Уравнение регрессии		
		Коэф. кор- реля- ции	по концен- трации	по глубине															
1	Суммарное содержание																		
	Май 1992 До санации	-0.50	0.43	-19.69	0.28	-0.01	-0.96	0.96	-0.041	1.0	-0.06	-0.62	0.68	-0.35	0.57	-0.18			
	Июль 1992 После санации	0.94	13.25	63.80	-0.14	0.01	0.74	0.16	45.57	0.04	0.007	0.53	0.35	-0.009	-0.37	0.07			
	Сент. 1992 санации	-0.56	8.11	-16.92	0.29	-0.01	0.99	-0.28	49.74	-0.45	0.02	-0.81	0.60	-0.011	0.62	-0.009			
	Июль 1993																		
2	Белый																		
	Май 1992 До санации	-0.97	0.72	-1.14	0.62	-0.84	-0.99	0.04	-0.03	1.64	-37.50	-0.94	0.11	-0.11	0.82	-5.55			
	Июль 1992 После санации	-0.73	0.75	-2.04	0.31	-0.30	0.99	-1.44	14.86	-0.008	0.07	0.59	0.08	0.004	-0.41	9.00			
	Сент. 1992 санации	-0.03	0.63	-0.28	0.22	-0.02	0.99	-0.88	14.81	-0.05	0.07	-0.77	63.52	-69.60	0.67	-0.007			
	Июль 1993																		
3	Толуол																		
	Май 1992 До санации	-0.96	0.53	-1.16	0.42	-0.74	-0.99	0.18	-0.15	1.24	-7.56	-0.68	0.60	-0.84	0.54	-0.50			
	Июль 1992 После санации	-0.72	0.17	-0.24	0.48	-2.16	0.98	1.29	3.46	-0.53	0.32	-0.94	0.61	0.09	0.93	-0.66			
	Сент. 1992 санации	0.09	0.32	0.11	0.18	0.08	0.94	-0.73	10.60	0.02	0.09	-0.43	48.51	-28.41	0.67	-0.008			
	Июль 1993																		
4	Этилбензол																		
	Май 1992 До санации	-0.97	1.24	-2.22	0.54	-0.42	-0.93	3.14	-3.75	0.80	-0.27	-0.68	0.32	-0.39	0.65	-1.41			
	Июль 1992 После санации	-0.82	2.66	-6.17	0.36	-0.10	-0.97	6.15	-2.69	2.45	-0.41	0.08	-0.34	0.25	0.32	0.09			
	Сент. 1992 санации	-0.75	1.77	4.11	0.29	-0.12	-0.68	9.28	-6.02	0.99	-0.07	-0.79	10.38	-96.32	0.59	-0.005			
	Июль 1993																		
5	Метилбаксилол																		
	Май 1992 До санации	-0.92	1.15	-3.24	0.33	-0.26	-0.94	0.73	-0.86	0.82	-1.22	-0.66	0.21	-0.33	0.54	-1.53			
	Июль 1992 После санации	0.66	0.68	3.23	0.32	-0.23	0.84	1.14	2.35	-0.38	0.36	-0.41	0.28	-0.32	0.55	-1.00			
	Сент. 1992 санации	-0.22	0.27	-0.37	0.24	-0.13	0.08	5.50	0.53	0.48	0.006	-0.80	54.33	-74.04	0.61	-0.007			
	Июль 1993																		

Продолжение табл. 2.4

80

		Скважина № 1				Скважина № 2				Скважина № 3				
№ п/п	Изучаемый показатель	Уравнение регрессии по концентрации				Уравнение регрессии по глубине				Уравнение регрессии по концентрации				
		Коэф. корреляции $r$	Коэф. концентрации	по глубине	Коэф. корреляции $r$	Коэф. концентрации	по глубине	Коэф. корреляции $r$	Коэф. концентрации	по глубине	Свобод. член	Угл. коэф.	Свобод. член	Угл. коэф.
6	<b>Оптоксимол</b>													
		Май 1992	До санации	-0.28	4.56	-9.46	0.23	-0.008	-1.00	0.25	-0.27	0.95	-4.20	
		Июль 1992	После санации	0.53	0.22	4.11	0.13	0.06	0.74	1.61	0.09	-0.54	0.18	-0.03
		Сент. 1992		-0.32	0.11	-0.20	0.25	-0.50	0.32	2.88	3.53	0.32	0.04	-0.92
7	<b>Стиром</b>													
		Май 1992	До санации	-0.37	0.37	-0.83	0.24	-0.16	-0.94	0.73	-0.86	0.82	-1.22	
		Июль 1992	После санации	0.85	1.06	2.99	-0.20	0.24	0.92	0.75	0.32	-2.40	3.12	-0.94
		Сент. 1992		-0.72	1.11	-0.91	0.73	-0.56	0.96	-2.80	14.97	0.13	0.07	-0.30
8	<b>Изомасляный алdehyde</b>													
		Май 1992	До санации	-0.94	0.30	-0.64	0.44	-1.38	-0.79	1.46	-0.83	1.35	-0.83	
		Июль 1992	После санации	-0.73	3.36	-8.16	0.32	-0.06	0.82	-1.11	-11.0	0.14	0.07	0.53
		Сент. 1992		-0.69	2.89	-8.45	0.29	-0.12					-0.86	41.15
9	<b>Масляный эфир</b>													
		Май 1992	До санации	-0.97	0.18	-0.36	0.51	-2.65						
		Июль 1992	После санации	-0.81	1.06	-2.89	0.31	-0.23						
		Сент. 1992		-0.27	0.63	-0.99	0.24	-0.07						
10	<b>Изобутиловый спирт</b>													
		Май 1992	До санации							-0.90	2.73	-3.28	0.79	-0.29
		Сент. 1992								-0.07	1.25	1.95	0.54	-0.07
		Июль 1993								-0.92	1.35	-1.79	0.72	-0.56

Продолжение табл. 2.4

Продолжение табл. 2.4

Продолжение табл. 2.4

Продолжение табл. 2.4

№ пп	Изучаемый показатель	Скважина № 5				Скважина № 17				Скважина № 4			
		Уравнение регрессии				Уравнение регрессии				Уравнение регрессии			
		Кооф. кор- реля- ции $r$	по концентрации	по глубине	Кооф. кор- реля- ции $r$	по концентрации	по глубине	Кооф. кор- реля- ции $r$	по концентрации	по глубине	Кооф. кор- реля- ции $r$	по концентрации	по глубине
6	<b>Ортоксилол</b>												
		Май 1992	До санации	-0,96	16,89	-36,32	0,44	-0,02	-0,99	17,27	-19,75	0,87	-0,04
		Июль 1992	После санации	-0,64	67,72	-132,5	0,33	-0,003	0,29	1,73	1,77	0,29	0,05
		Сент. 1992		-0,20	0,61	-0,39	0,26	-0,10	-0,29	1,49	-0,79	0,54	-0,10
		Июль 1993											
7	<b>Стройол</b>	Май 1992	До санации	-0,96	20,69	-47,29	0,42	-0,02	-0,94	18,23	-21,74	0,79	-0,04
		Июль 1992	После санации	-0,55	90,03	-178,7	0,33	-0,002	0,004	5,61	0,02	0,41	0,000
		Сент. 1992		-				-0,21	0,98	-0,11	0,78	-0,39	0,69
		Июль 1993											
8	<b>Изомасляный эфтеренол</b>	Май 1992	До санации	-0,90	3,56	-9,72	0,33	-0,08	-0,96	15,15	-14,92	0,97	-0,06
		Июль 1992	После санации	-0,38	41,57	-89,98	0,29	-0,004	0,22	3,64	1,28	0,37	0,01
		Сент. 1992		-					0,93	0,32	0,60	-0,41	1,44
		Июль 1993											
9	<b>Масляный эфтеренол</b>	Май 1992	До санации	-0,81	4,43	-13,33	0,29	-0,05	-0,94	14,11	-14,85	0,89	-0,05
		Июль 1992	После санации	-0,65	27,20	-54,84	0,33	-0,008	0,15	0,88	0,09	0,18	0,25
		Сент. 1992		-0,39	5,81	-7,10	0,30	-0,02	0,31	0,56	0,76	0,30	0,12
		Июль 1993											
10	<b>Изобутиловый спирт</b>	Май 1992	До санации	-0,86	5,71	-16,90	0,30	-0,04	-0,99	1,92	-2,21	0,86	-0,44
		Июль 1992	После санации	-0,48	23,01	-27,94	0,35	-	0,33	2,05	2,32	0,28	0,04
		Сент. 1992		-						0,30	0,29	1,19	0,35
		Июль 1993											

Продолжение табл. 2.4

Продолжение табл. 2.4

86

Окончание табл. 2.4

Таблица 2.5  
Эффективность санации на различных глубинах по скважине 15

Глубина отбора проб, м	Суммарное содержание УВ, мг/100 г почвы	Отношение концентрации УВ до санации к концентрации после санации					
		Бензол	Толуол	Этилбензол	Метапаркисилол	Орто-ксилол	Стирол
0 - 0,1	31,2	12,7	12,6	81,5	27,3	27,0	89,3
0,1 - 0,2	100,7	44,0	35,4	98,0	56,2	64,1	130,5
0,2 - 0,3	56,6	36,2	1,1	42,6	22,7	49,7	124,1
0,3 - 0,5	123,0	2,5	0,25	10,1	2,74	27,6	135,0
0,7 - 1,0	3,6	0,81	0,075	0,91	0,58	3,8	4,8

Для установления механизма изменения содержания и состава углеводородов изучены корреляционные связи между суммарным содержанием углеводородов и отдельными компонентами до санации и в процессе санации (табл. 2.6). Обнаружено, что до санации наблюдается единая углеводородная система: сумма углеводородов сильно связана с бензолом, толуолом, этилбензолом, ксилолом, ортоксилолом и стиролом. После очистки в июле 1992 года при значительном снижении концентраций УВ происходит значительное ослабление связей между суммой УВ и бензолом, толуолом, этилбензолом, остаются значимые связи с метапаркисилолом, ортоксилолом и стиролом (см. табл. 2.6). После очистки в сентябре происходит также некоторое снижение суммарного количества углеводородов, при этом восстанавливаются связи с бензолом, толуолом, ортоксилолом и ослабляются со стиролом (-0,48), остается слабая связь с этилбензолом. На конечном этапе санации в июле 1993 года происходит некоторое снижение связи с бензолом, толуолом, этилбензолом, метапаркисилолом и ортоксилолом и значительное изменение связи со стиролом. Кроме этого, анализ корреляционной матрицы в целом показывает, что на всех этапах санации для бензола и толуола значимых корреляционных связей намного больше, чем для других соединений (этилбензол, ксилол, стирол).

Это, вероятно, свидетельствует о том, что соединения бензола и толуола поддаются разрушению меньше, чем соединения остальных УВ, что достаточно хорошо подтверждается и химическими характеристиками самих соединений.

#### *Описание результатов по скв. 17.*

В табл. 2.3 приведены данные по содержанию углеводородных соединений по скв. 17. По этим данным видно, что в процессе санации агротехническим способом произошли значительные изменения как в сум-

Таблица 2.6

**Корреляционная матрица исследуемых показателей до санации и после санации нефтезагрязненных грунтов по скважине 15**

		Комплексы УВ и типы санации																										
		Суммарное содержание УВ			Бензол			Толуол			Этилбензол			М-ксиленол			Окислов		Стирол									
Комплекс УВ	Этап санации	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3									
		1,0	0,3	<b>0,88</b>	0,19	<b>0,94</b>	0,75	<b>0,92</b>	0,72	<b>0,95</b>	0,78	<b>0,89</b>	0,81	<b>0,98</b>	-0,58	0,49	-0,61	0,97	-0,27	0,84	-0,27	1,00	0,10	<b>0,84</b>	-0,17	<b>0,48</b>	-0,53	
Суммарное содержание УВ	1	1,0	0,41	<b>0,98</b>	0,34	<b>0,64</b>	0,40	<b>0,68</b>	0,31	<b>0,58</b>	0,41	<b>0,49</b>	0,05	<b>0,74</b>	0,10	-0,70	0,23	<b>0,94</b>	0,49	<b>0,90</b>	-0,06	<b>0,98</b>	0,49	<b>0,90</b>	-0,18	<b>0,95</b>	-0,36	<b>0,49</b>
	2	1,00	0,57	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>	<b>0,95</b>	<b>0,95</b>	<b>0,95</b>	<b>0,95</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,94</b>	<b>0,98</b>	-0,31	<b>0,72</b>	<b>0,61</b>	-0,36	<b>0,97</b>	<b>0,15</b>	<b>0,19</b>	-0,35	<b>0,72</b>	-0,15	<b>0,72</b>	-0,19	<b>0,41</b>	
Бензол	1	1,00	0,49	<b>0,77</b>	<b>0,55</b>	<b>0,45</b>	<b>0,42</b>	<b>0,50</b>	<b>0,45</b>	<b>0,40</b>	<b>0,49</b>	<b>0,59</b>	<b>0,22</b>	<b>0,55</b>	<b>0,40</b>	<b>0,89</b>	<b>0,64</b>	<b>0,86</b>	<b>0,11</b>	<b>0,92</b>	<b>0,64</b>	<b>0,86</b>	<b>0,05</b>	<b>0,87</b>	-0,34	<b>0,41</b>		
	2	1,00	0,93	<b>0,99</b>	<b>0,91</b>	<b>0,98</b>	<b>0,94</b>	<b>0,99</b>	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,98</b>	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,99</b>	-0,35	<b>0,53</b>	-0,40	<b>0,99</b>	0,04	<b>0,97</b>	0,05	<b>0,91</b>	<b>0,19</b>	<b>0,99</b>	0,05	<b>0,81</b>	0,10	<b>0,46</b>
Этилбензол	1	1,00	0,95	<b>1,00</b>	<b>0,98</b>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	<b>0,98</b>	<b>0,71</b>	<b>-0,04</b>	<b>0,49</b>	<b>-0,10</b>	<b>0,89</b>	<b>0,39</b>	<b>0,98</b>	<b>0,41</b>	<b>0,70</b>	<b>0,49</b>	<b>0,98</b>	<b>0,41</b>	<b>0,54</b>	<b>0,41</b>	<b>-0,39</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,23</b>		
	2	1,00	0,93	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,90</b>	<b>-0,29</b>	<b>0,59</b>	<b>-0,34</b>	<b>0,59</b>	<b>0,13</b>	<b>0,99</b>	<b>0,14</b>	<b>0,88</b>	<b>0,25</b>	<b>0,99</b>	<b>0,14</b>	<b>0,78</b>	<b>0,16</b>	<b>-0,45</b>	<b>-0,23</b>			
М-ксиленол	1	1,00	0,86	<b>0,92</b>	<b>0,92</b>	<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	<b>0,58</b>	<b>0,00</b>	<b>0,51</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,86</b>	<b>0,44</b>	<b>0,97</b>	<b>0,46</b>	<b>0,66</b>	<b>0,53</b>	<b>0,97</b>	<b>0,46</b>	<b>0,51</b>	<b>0,45</b>	<b>-0,39</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,36</b>	<b>-0,23</b>			
	2	1,00	0,89	<b>0,94</b>	<b>0,89</b>	<b>0,94</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	<b>0,56</b>	<b>-0,38</b>	<b>0,97</b>	<b>0,02</b>	<b>0,94</b>	<b>0,01</b>	<b>0,93</b>	<b>0,18</b>	<b>0,94</b>	<b>0,10</b>	<b>0,87</b>	<b>0,09</b>	<b>-0,55</b>	<b>-0,30</b>				
Стирол	1	1,00	0,98	<b>0,99</b>	<b>0,73</b>	<b>-0,13</b>	<b>0,57</b>	<b>-0,18</b>	<b>0,91</b>	<b>0,33</b>	<b>0,99</b>	<b>0,37</b>	<b>0,73</b>	<b>0,41</b>	<b>0,99</b>	<b>0,37</b>	<b>0,73</b>	<b>0,41</b>	<b>0,99</b>	<b>0,37</b>	<b>0,58</b>	<b>0,32</b>	<b>-0,31</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,26</b>			
	2	1,00	0,99	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,94</b>	<b>0,55</b>	<b>0,98</b>	<b>0,16</b>	<b>0,99</b>	<b>0,16</b>	<b>0,99</b>	<b>0,16</b>	<b>0,72</b>	<b>0,16</b>	<b>0,72</b>	<b>0,16</b>	<b>0,23</b>		
М-ксиленол	1	1,00	0,75	<b>0,22</b>	<b>0,52</b>	<b>-0,28</b>	<b>0,94</b>	<b>0,22</b>	<b>0,98</b>	<b>0,26</b>	<b>0,77</b>	<b>0,33</b>	<b>0,98</b>	<b>0,26</b>	<b>0,77</b>	<b>0,33</b>	<b>0,98</b>	<b>0,26</b>	<b>0,61</b>	<b>0,24</b>	<b>-0,31</b>	<b>-0,19</b>	<b>-0,23</b>					
	2	1,00	0,90	<b>0,53</b>	<b>0,53</b>	<b>-0,56</b>	<b>0,93</b>	<b>-0,23</b>	<b>0,81</b>	<b>-0,26</b>	<b>0,98</b>	<b>-0,07</b>	<b>0,81</b>	<b>-0,26</b>	<b>0,98</b>	<b>-0,07</b>	<b>0,81</b>	<b>-0,26</b>	<b>0,97</b>	<b>-0,15</b>	<b>-0,54</b>	<b>-0,45</b>	<b>-0,36</b>					
Этилбензол	1	1,00	0,40	<b>1,00</b>	<b>-0,45</b>	<b>0,84</b>	<b>-0,22</b>	<b>0,75</b>	<b>-0,65</b>	<b>0,85</b>	<b>-0,22</b>	<b>0,75</b>	<b>-0,65</b>	<b>0,85</b>	<b>-0,22</b>	<b>0,75</b>	<b>-0,65</b>	<b>0,89</b>	<b>-0,76</b>	<b>0,78</b>	<b>-0,23</b>	<b>0,58</b>	<b>-0,23</b>	<b>-0,78</b>				
	2	1,00	0,42	<b>0,51</b>	<b>0,10</b>	<b>0,63</b>	<b>0,20</b>	<b>0,52</b>	<b>0,20</b>	<b>0,52</b>	<b>0,10</b>	<b>0,63</b>	<b>0,20</b>	<b>0,52</b>	<b>0,10</b>	<b>0,63</b>	<b>0,20</b>	<b>0,52</b>	<b>0,20</b>	<b>0,66</b>	<b>-0,21</b>	<b>0,26</b>	<b>-0,36</b>					
Окислов	1	1,00	-0,49	<b>0,81</b>	<b>0,27</b>	<b>0,73</b>	<b>-0,68</b>	<b>0,82</b>	<b>-0,27</b>	<b>0,73</b>	<b>-0,68</b>	<b>0,82</b>	<b>-0,27</b>	<b>0,73</b>	<b>-0,68</b>	<b>0,82</b>	<b>-0,27</b>	<b>0,73</b>	<b>-0,69</b>	<b>0,86</b>	<b>-0,21</b>	<b>0,58</b>	<b>-0,23</b>					
	2	1,00	-0,07	<b>0,94</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,95</b>	<b>0,80</b>	<b>0,94</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,95</b>	<b>0,80</b>	<b>0,94</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,95</b>	<b>0,80</b>	<b>0,94</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,95</b>	<b>0,80</b>	<b>0,94</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,95</b>	<b>0,80</b>	<b>0,94</b>	<b>-0,41</b>			
Стирол	1	1,00	0,25	<b>0,98</b>	<b>-0,34</b>	<b>0,93</b>	<b>0,25</b>	<b>0,98</b>	<b>0,25</b>																			
	2	1,00	0,28	<b>0,80</b>	<b>0,33</b>	<b>0,09</b>	<b>0,28</b>	<b>0,80</b>	<b>0,33</b>	<b>0,09</b>	<b>0,28</b>	<b>0,80</b>	<b>0,33</b>	<b>0,09</b>	<b>0,28</b>	<b>0,80</b>	<b>0,33</b>	<b>0,09</b>	<b>0,28</b>	<b>0,80</b>	<b>0,33</b>	<b>0,09</b>	<b>0,28</b>	<b>0,80</b>	<b>0,33</b>			

*Примечание.* Жирным шрифтом выделены значимые корреляционные связи.

марном содержании УВ, так и по отдельным составляющим. До проведения санации существовала тенденция уменьшения концентраций суммарного содержания УВ и отдельных их компонентов с глубиной (от -0,92 до -0,99).

Статистические модели изучаемой связи приведены в табл. 2.4.

На первом этапе санации среднее значение суммарной концентрации УВ в почвогрунтах снизилось более, чем в два раза (первоначальное содержание УВ в почвогрунтах составляло 51,01 мг/100 г почвы, а после первого этапа санации снизилось до 21,41 мг/100 г почвы). На втором этапе санации среднее содержание УВ в почвогрунтах также снизилось до 8,14 мг/100 г почвы. При этом нарушилась тенденция уменьшения концентраций УВ в почвогрунтах с глубиной, о чем свидетельствуют положительные значения коэффициентов корреляции, так до санации  $r = -0,96$ , после первого этапа санации  $r = 0,31$  и после второго этапа санации  $r = 0,21$ .

На первом этапе санации по всем исследуемым компонентам УВ, кроме изобутилового спирта, наблюдается уменьшение их среднего содержания в почвогрунтах. На втором этапе санации наблюдается подобная же закономерность, за исключением бензола, его среднее содержание увеличивается с 0,53 мг/100 г почвы после первого этапа санации до 1,64 мг/100 г почвы после второго этапа санации.

Следует отметить, что после первого этапа санации по всем компонентам УВ нарушается тенденция уменьшения концентраций УВ с глубиной. После второго этапа санации данная закономерность сохраняется, за исключением этилбензола, ортоксиола, стирола. Это свидетельствует о том, что на первом этапе санации идет достаточно интенсивно процесс деструкции углеводородов, а на втором этапе санации он замедляется для этилбензола, ортоксиола и стирола.

В табл. 2.7 приведены коэффициенты корреляции между изучаемыми показателями до санации и в процессе ее. Суммарное содержание УВ характеризуется значительными корреляционными связями со всеми составляющими органических соединений. Количество бензола слабо коррелирует с суммарным содержанием УВ на первом этапе санации, тогда как по толуолу и другим соединениям эта связь корреляционно значимая. На втором этапе связь с бензолом восстанавливается, но ослабляется с другими компонентами.

#### *Описание результатов по скв. 3.*

Санация в скв. 3 выполнялась биологическим способом. До санации в скв. 3 было достаточно мало углеводородов, затем в июле их количество несколько увеличилось, и резко возросло в сентябре (см. табл. 2.2).

До санации наблюдалось закономерное уменьшение суммарного содержания УВ с глубиной, при этом отсутствовали ортоксиол, стирол,

Таблица 2.7

**Корреляционная матрица исследуемых показателей в процессе санации нефтезагрязненных грунтов по скважине 17**

Компоненты УВ	Компоненты УВ в этапах санации										Максимальный альготест	Максимальный альготест	Избыточный спирт																
	Суммарное содержание УВ	Бензин	Толуол	Этилбензол	М-ксиол	С-ксиол	Стирол	Изомасляный алготест	До	1	2	До	1	2	До	1	2												
Этил- сито- прак	До	1	2	До	1	2	До	1	2	До	1	2	До	1	2	До	1	2											
Суммар- ное соеди- нение УВ	До	-0,24	0,02	0,97	-0,91	-0,31	0,96	-0,32	-0,57	0,96	-0,23	0,50	0,96	0,02	-0,03	0,99	-0,15	-0,94	1,00	-0,23	-0,00	-0,21							
Суммар- ное соеди- нение УВ	1	1,00	0,40	0,20	0,15	0,25	0,99	0,2	0,97	0,41	0,02	0,99	0,13	0,28	1,00	0,08	-0,43	0,15	1,00	0,54	-0,15	0,24	0,95	0,97					
Суммар- ное соеди- нение УВ	2	1,00	-0,17	-0,22	0,91	-0,24	-0,31	0,63	-0,24	0,22	0,66	0,11	0,28	0,92	-0,12	0,37	0,96	-0,03	0,14	-0,69	0,03	0,41	0,10	0,68	0,43	0,61	-0,21	0,64	0,55
Бензин	До	1,00	0,06	0,49	0,99	-0,23	0,69	1,00	-0,07	0,09	0,95	-0,17	0,13	0,99	-0,18	0,31	0,94	0,12	0,02	0,96	-0,11	-0,90	-0,19	-0,20	0,98	-0,23	-0,22		
Бензин	1	1,00	0,18	0,56	-0,08	-0,46	-0,27	-0,19	0,98	0,18	0,4	-0,88	-0,57	-0,81	0,39	0,15	0,94	-0,27	0,72	0,92	-0,18	0,15	-0,87	-0,20	-0,21	0,38	0,34		
Бензин	2	1,00	-0,55	0,20	0,89	-0,36	0,02	-0,27	0,12	0,80	-0,44	0,21	0,66	-0,30	-0,09	-0,70	-0,34	0,22	0,33	-0,23	0,28	0,74	-0,53	-0,23	0,28	0,38			
Бензин	Р	1,00	0,04	0,31	-0,73	1,00	-0,10	0,07	0,93	-0,21	0,66	0,29	-0,24	0,25	0,93	-0,07	0,14	0,96	-0,17	-0,91	0,94	-0,25	-0,22	0,59	-0,30	-0,28			
Толуол	1	1,00	0,04	-0,28	0,95	-0,51	-0,07	0,98	0,93	-0,35	0,99	0,04	0,50	0,97	-0,36	0,94	-0,26	0,94	-0,50	0,97	0,61	0,28	0,96	0,50	0,31	0,93			
Толуол	2	1,00	-0,73	-0,22	-0,49	-0,58	-0,10	0,32	-0,66	-0,01	0,32	-0,48	-0,33	-0,61	-0,53	-0,03	0,47	-0,51	0,0	0,75	-0,76	0,21	0,10	-0,27	-0,27	-0,26			
Этилбен- зол	До	1,00	0,08	0,05	0,93	-0,19	0,06	0,99	-0,21	0,25	0,93	0,10	0,12	0,95	-0,14	0,96	-0,24	0,96	-0,27	0,99	-0,24	0,99	-0,27	0,99	-0,27	0,99	-0,27		
Этилбен- зол	1	1,00	-0,53	0,11	0,99	-0,04	-0,15	0,97	-0,14	0,94	0,97	-0,34	0,97	-0,13	0,02	0,98	-0,46	0,12	0,96	0,93	0,08	0,98	0,91	-0,15	0,93	-0,22			
М-и- ксиол	2	1,00	0,20	-0,51	0,82	-0,22	-0,44	0,83	0,40	-0,37	0,33	0,26	-0,39	-0,32	0,34	-0,38	0,93	0,10	-0,15	-0,22	0,93	0,10	-0,15	-0,22	0,93	0,10	-0,22		
М-и- ксиол	Р	1,00	0,02	0,35	0,95	0,03	0,53	0,98	0,27	0,13	0,98	0,27	0,13	0,98	0,27	0,13	0,98	0,11	0,83	0,97	0,05	0,13	0,93	0,04	0,03	0,93			
М-и- ксиол	1	1,00	0,00	0,50	0,99	-0,51	-0,07	0,98	0,99	-0,35	0,99	0,04	0,50	0,97	-0,36	0,94	-0,36	0,94	-0,50	0,97	0,61	0,28	0,96	0,50	0,31	0,92			
М-и- ксиол	2	1,00	0,19	0,09	0,97	-0,32	0,05	0,73	0,73	-0,32	0,97	0,13	0,26	0,98	-0,32	0,96	-0,32	0,96	-0,32	0,97	0,72	0,07	0,98	-0,27	0,98	0,27			
М-и- ксиол	Р	1,00	-0,27	-0,38	-0,97	0,01	0,08	0,98	0,98	-0,19	0,98	-0,19	0,08	0,98	-0,19	0,08	0,98	-0,19	0,08	0,98	-0,28	0,98	-0,28	0,98	-0,28	0,98			
О-ксиол	1	1,00	0,05	-0,42	0,94	-0,13	-0,14	0,96	-0,14	0,96	0,96	-0,39	0,97	-0,13	0,04	0,98	-0,46	0,12	0,96	0,93	0,08	0,98	0,91	-0,15	0,93	-0,22			
О-ксиол	2	1,00	0,48	-0,03	-0,59	0,99	-0,03	-0,59	0,99	-0,12	-0,43	0,99	-0,12	0,99	-0,12	0,99	-0,12	0,99	-0,12	0,99	0,53	0,11	0,65	0,27	0,32	0,23			
Стирол	1	1,00	0,21	0,11	0,94	-0,30	0,21	0,97	0,11	0,94	0,10	0,18	-0,02	0,94	-0,35	-0,99	0,97	-0,42	0,14	0,93	-0,38	-0,40	0,93	-0,16	0,93	0,16			
Стирол	2	1,00	0,04	-0,32	-0,94	-0,12	-0,38	-0,92	0,04	0,94	-0,12	0,94	-0,12	0,94	-0,12	0,94	-0,12	0,94	-0,12	0,94	0,53	0,11	0,65	0,27	0,32	0,23			
Изомас- лический альготест	1	1,00	-0,03	-0,30	0,98	-0,14	-0,08	0,97	-0,13	0,98	-0,14	0,98	-0,14	0,98	-0,14	0,98	-0,14	0,98	-0,14	0,98	-0,13	0,98	-0,13	-0,11	0,98	0,98			
Максимальный альготест	1	1,00	0,47	0,11	0,99	-0,46	0,15	0,96	-0,46	0,16	0,96	-0,46	0,15	0,96	-0,46	0,15	0,96	-0,46	0,15	0,96	0,53	0,10	0,51	0,27	0,34	0,23			
Изобути- ловый спирт	2	1,00	-0,22	-0,19	-0,22	0,99	-0,27	-0,99	0,00	0,99	-0,27	0,99	-0,27	0,99	-0,27	0,99	-0,27	0,99	-0,27	0,99	0,53	0,10	0,51	0,27	0,34	0,23			
Изобути- ловый спирт	Р	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			

изомасляный альдегид, масляный альдегид, изобутиловый спирт и 2-этилгексаналь. На первом этапе санации состав несколько изменился и на втором этапе значительно расширился за счет высоких концентраций бензола, толуола, этилбензола, метапарааксилола, ортоксилона, стирола, изомасляного и масляного альдегидов. Особенно много углеводородов наблюдалось на глубинах 0,1-0,2 м (543,3 мг /100 г почвы). То есть в процессе работ по санации в скважине появились новые порции ароматических УВ, на фоне которых определить эффективность тех мероприятий, которые проводились, не представляется возможным. В табл. 2.8 приведены коэффициенты корреляции между суммой УВ и отдельными компонентами. Анализ этих связей свидетельствует о сложном протекании процесса изменения углеводородов во времени, когда, с одной стороны, присутствует явление санации, а с другой – происходит подток углеводородов в скважину извне.

#### *Описание результатов по скв. 1.*

Данные о содержании УВ в грунтах по скв. 1 приведены в табл. 2.2, 2.3. По ним видно, что суммарное среднее содержание до санации было незначительное, со слабой тенденцией уменьшения с глубиной. При этом по ряду соединений уменьшение концентраций прослеживается сильно (бензол, толуол и др.), по другим связь нарушается (стирол, ортоксилона) (см. табл. 2.4). На первом этапе санации эффекта не получено, значительное снижение содержания УВ произошло только на втором этапе в сентябре 1992 года.

Повышение концентраций на первом этапе санации в июле произошло за счет появления в значительных количествах 2-этилгексанола, 2-этилгексаналя и 2-этилгексеналя (см. табл. 2.2). Нарушена тенденция уменьшения УВ с глубиной, она поменялась на обратную ( $r = 0,94$ ), и только при снижении концентраций УВ после второго этапа санации в сентябре снова появляется эта тенденция (слабая) – с увеличением глубины содержание углеводородов в почвогрунтах уменьшается (см. табл. 2.4). Проведен расчет по корреляции между суммарным содержанием УВ и отдельными компонентами, который показывает, что суммарные концентрации до санации слабо коррелируются со многими компонентами и сильно только с ортоксилона и стиролом (табл. 2.9). На первом этапе санации сильных связей не наблюдается между суммарным содержанием и отдельными соединениями.

На втором этапе санации сильные связи есть только между ортоксилона, изомасляным альдегидом, масляным альдегидом и изобутиловым спиртом.

Приведенные данные по скв. 1 свидетельствуют о снижении процессов санации во времени и, вероятно, о незавершенности процесса из-за привноса УВ в скважину извне в процессе санации.

Таблица 2.8

**Корреляционная матрица исследуемых показателей в процессе санации  
нефтезагрязненных грунтов по скважине 3**

		Компоненты УГ и этапы санации																							
		Суммарное содержание УВ			Бентонит			Толуол			Этиленбензол			М-хисилол			О-хисилол			Строй		Изомасляный алькенол			
Этапы санации	УВ	РФ	1	2	РФ	1	2	РФ	1	2	РФ	1	2	РФ	1	2	РФ	1	2	РФ	1	2	РФ	1	
ДР	1,00	-0,05	0,88	0,8	0,24	0,86	<b>0,99</b>	0,8	0,58	<b>1,00</b>	0,86	<b>1,00</b>	0,90	0,92	0,00	0,35	<b>0,98</b>	0,00	0,8	<b>0,45</b>	0,00	0,45	0,00	0,30	<b>0,95</b>
Суммарное со- держание УВ	1	1,00	-0,51	-0,1	0,47	-0,55	0,05	-0,1	-0,81	-0,06	0,1	-0,54	-0,11	0,38	-0,44	0,00	0,75	-0,26	0,00	-0,1	-0,90	0,00	0,73	-0,32	
2	1,00	0,8	-0,03	<b>1,00</b>	0,83	0,8	0,88	-0,8	0,90	0,91	0,91	0,59	<b>1,00</b>	0,00	-0,05	<b>0,96</b>	0,00	0,8	0,81	0,00	-0,10	<b>0,97</b>	0,00	0,00	
РФ	1,0	-0,26	0,72	0,81	1,0	0,38	0,89	-1,0	0,75	0,85	0,67	0,80	0,00	0,00	0,58	0,84	0,00	1,0	0,30	0,00	-0,07	0,74	0,00	0,00	
Бентонит	1	1,00	-0,03	0,32	-0,3	-0,06	0,15	0,3	-0,06	0,20	0,32	-0,02	0,00	-0,00	0,11	0,00	-0,3	-0,19	0,00	0,98	0,00	0,20	0,00	0,00	
2	1,00	0,81	0,7	0,90	0,86	-0,7	1,00	0,89	0,55	<b>0,99</b>	0,00	-0,09	0,95	0,00	0,00	0,7	0,83	0,00	-0,11	0,96	0,00	0,40	0,00	0,00	
ДР	1	1,00	0,8	0,51	<b>0,98</b>	0,98	-0,8	0,81	<b>0,99</b>	0,93	0,87	0,00	0,40	0,95	0,00	0,00	0,8	0,37	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	
Толуол	1	1,0	0,38	0,89	-1,0	0,75	0,85	0,82	0,80	0,00	0,58	0,84	0,00	1,0	0,30	0,00	-0,07	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	1,00	0,56	-0,4	0,89	0,63	0,16	<b>0,83</b>	0,00	-0,51	0,73	0,00	0,4	<b>0,99</b>	0,00	-0,29	0,79	0,00	0,00	-0,29	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	
Этиленбензол	1	1,00	-0,9	0,87	<b>0,99</b>	0,90	0,92	0,00	0,39	<b>0,98</b>	0,00	0,9	<b>0,44</b>	0,00	0,00	0,9	0,44	0,00	0,24	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	1,00	-0,75	-0,85	-0,82	-0,80	0,00	-0,58	-0,84	0,00	-0,10	-0,30	0,00	-0,07	-0,74	0,00	0,00	-0,30	0,00	-0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
М-хисилол	1	1,00	0,89	0,56	0,99	0,56	<b>0,99</b>	0,00	-0,07	<b>0,95</b>	0,00	0,07	<b>0,95</b>	0,00	0,00	0,7	0,83	0,00	-0,13	0,96	0,00	0,25	0,00	0,00	
О-хисилол	2	1,00	0,87	0,94	0,00	0,31	0,31	0,59	0,00	0,8	0,50	0,00	0,8	0,50	0,00	0,8	0,50	0,00	0,25	<b>0,97</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	
Строй	1	1,00	0,66	0,00	0,71	0,79	0,00	0,8	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Изомасляный алькенол	2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Изомасляный алькенол	1	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Изомасляный алькенол	2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Таблица 2.9

**Корреляционная матрица исследуемых показателей до санации и после санации**  
**Нефтезагрязненных грунтов по скажине**

*Описание результатов по скв. 2.*

Данные о содержании УВ в грунтах скв. 2 приведены в табл. 2.2, 2.3, 2.4, по которым видно, что до начала санации их содержание было незначительно и с глубиной закономерно снижалось, о чем свидетельствуют высокие отрицательные коэффициенты корреляции ( $-0,79 \div 1,0$ ). Необходимо отметить, что эта связь прослеживается по всем составляющим УВ. В июле 1992 г. в скв. 2 поступили новые порции углеводородов, при этом их количество увеличилось с глубиной и появились компоненты, которые до этого в скв. 2 ранее не наблюдались — масляный альдегид, 2-этилгексанол, 2-этилгексаналь и в очень больших количествах 2-этилгексеналь. В сентябре их количество несколько снизилось, но все равно содержание было достаточно высокое (см. табл. 2.2, 2.3). Отмечается, что содержание бензола, толуола, метапараксилола, стирола на различных глубинах резко изменилось. Например, на глубине 0,7 – 1,0 м количество 2-этилгексанола за это время осталось постоянным, тогда как 2-этилгексаналя уменьшилось более чем в 2 раза (см. табл. 2.2). Расчеты корреляционных связей между изученными компонентами УВ показали, что до начала санации существовали значительные корреляционные связи суммарного содержания УВ практически со всеми компонентами, тогда как в июле после первого этапа санации за счет привноса извне значительного количества УВ в почвогрунты эти связи нарушились (см. табл. 2.10). Также нарушилась тенденция уменьшения УВ с глубиной (см. табл. 2.4). В процессе санации на втором этапе, с одной стороны, восстановились связи с суммарным содержанием УВ по бензолу, толуолу, с другой стороны, значительно ослабились по метапараксилолу, изомасляному альдегиду. Все это свидетельствует о том, что в процессе наблюдений скв. 2 в нее поступали достаточно интенсивно новые порции углеводородов.

*Описание результатов по скв. 19.*

Данные об изменении содержания УВ в скв. 19 до санации и в процессе санации приведены в табл. 2.2–2.4, по которым видно, что за анализируемый период содержание УВ изменилось незначительно, при хаотическом распределении их по глубине. Связи между суммарными содержаниями УВ и отдельными составляющими до начала санации достаточно многообразны, от достаточно слабых по бензолу, толуолу и до очень сильных по метапараксилолу, ортоксилолу, стиролу, масляному альдегиду. В процессе санации эти связи значительно изменяются (табл. 2.11).

*Описание результатов по скв. 32.*

В табл. 2.2, 2.3 приведены результаты исследований, выполненных в скв. 32, по которым видно, что содержание УВ как до санации, так и после нее незначительно. Анализ показывает, что до санации распределение УВ с глубиной закономерно уменьшалось, в процессе санации наблюдаемое распределение вначале ослабло, а затем полностью разрушилось (см. табл. 2.4). Корреляционные связи между содержаниями УВ до санации и в

Таблица 2.10

Корреляционная матрица исследуемых показателей до санации и после санации  
Несфтезагрязненных группов по скважине 2

Таблица 2.11

Корреляционная матрица исследуемых показателей до санации и после санации нефтезагрязненных грунтов по скважине 19

Показатель	Скважина 19															%																									
	B ₂	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄																										
Сумма УВ	1,00	-0,71	0,47	0,65	-0,73	0,78	0,53	-0,27	-0,01	0,88	-0,84	0,62	0,99	-0,65	0,83	1,00	-0,15	0,99	-0,45	1,00	0,99	-0,57	0,93	0,99	-0,44	-0,40															
C ₁	1,00	0,06	-0,35	1,00	-0,22	-0,08	-0,32	0,48	-0,80	0,94	-0,28	1,00	-0,27	-0,72	0,97	0,55	-0,67	0,91	-0,68	-0,67	0,83	-0,57	-0,72	0,92	0,75																
C ₂		1,00	0,40	-0,03	0,91	0,55	-0,96	0,88	0,44	0,13	0,94	0,46	-0,8	0,63	0,38	0,03	0,55	0,38	-0,32	0,74	0,34	0,10	0,61																		
Геодек			1,00	-0,41	0,20	0,52	-0,26	0,38	0,52	-0,05	0,61	0,14	-0,35	0,14	0,06	-0,23	0,54	-0,11	-0,67	0,13	-0,11	-0,79	0,31	-0,07	-0,62	0,26															
B ₁				1,00	-0,28	-0,16	-0,24	0,40	-0,35	0,93	-0,36	-0,80	0,99	-0,33	-0,74	0,97	-0,46	-0,68	0,92	-0,72	-0,68	-0,87	-0,63	-0,73	0,93	0,69															
B ₂					1,00	0,91	-0,82	0,61	0,73	-0,34	0,90	-0,74	-0,13	0,99	-0,77	-0,40	0,27	0,72	-0,08	0,83	0,72	-0,38	0,92	0,69	-0,04	-0,26															
Газоход						1,00	-0,91	0,82	0,63	-0,07	0,98	0,51	-0,01	0,86	0,51	-0,20	0,62	0,41	-0,12	0,60	0,41	-0,46	0,79	0,39	-0,06	0,54															
T ₁							1,00	-0,95	-0,30	-0,26	-0,81	-0,22	-0,39	-0,76	-0,26	-0,18	-0,74	-0,20	-0,29	-0,25	-0,20	0,06	-0,56	-0,15	-0,40	-0,92															
T ₂								1,00	0,12	0,50	0,71	-0,05	0,33	0,53	-0,03	0,39	0,91	-0,10	0,33	0,08	-0,10	-0,00	0,33	-0,15	-0,46	-0,77															
Этиленбенз									1,00	-0,78	0,79	0,92	-0,76	0,75	0,88	-0,87	0,98	-0,79	-0,74	0,91	0,79	-0,88	0,91	0,82	-0,71	-0,27															
Эп ₁										1,00	-0,24	-0,38	0,92	-0,41	-0,85	0,98	0,69	-0,85	0,71	-0,81	-0,85	0,65	-0,65	-0,65	-0,89	0,73	0,80														
М-п-хлопол											1,00	0,62	-0,21	0,86	0,61	-0,37	0,51	0,50	-0,32	0,69	0,50	-0,63	0,36	0,46	0,36	0,36	0,38														
M ₁												1,00	-0,72	0,80	1,00	-0,90	-0,35	0,97	-0,55	0,99	0,97	-0,65	0,93	0,98	-0,54	-0,44															
M ₂													1,00	-0,19	-0,66	0,95	-0,57	-0,61	0,92	-0,62	-0,61	0,82	-0,50	-0,67	0,94	0,78															
Оксиспол														1,00	0,82	-0,46	0,17	0,79	-0,10	0,87	0,79	-0,38	0,94	0,76	-0,06	0,61															
Ихоминский															1,00	-0,86	-0,36	0,99	-0,47	0,99	-0,56	0,93	0,99	-0,46	0,41																
Ихоминский																1,00	-0,46	0,26	-0,25	-0,46	-0,01	0,02	-0,49	0,32	0,95																
Окиси																	1,00	-0,36	0,97	1,00	-0,45	0,57	1,00	-0,36	-0,47																
Строй																		1,00	-0,46	-0,36	0,94	-0,61	0,96	0,97	-0,44	-0,32															
C ₁																			1,00	-0,46	-0,46	1,00	-0,45	0,87	1,00	-0,36	-0,47														
C ₂																				1,00	-0,45	-0,45	1,00	-0,45	0,87	1,00	-0,36	-0,47													
М-хлопол																					1,00	-0,65	-0,50	1,00	-0,65	0,91	1,00	-0,28													
Ихомы																						1,00	0,86	-0,39	1,00	-0,39	-0,67	1,00													
Масляный																							1,00	-0,43	1,00	-0,43	0,52														
швейц.																								1,00	-0,60	1,00	-0,60	1,00													
М ₁																									1,00	-0,60	1,00	-0,60	1,00												
М ₂																										1,00	-0,60	1,00	-0,60	1,00											

процессе ее разнообразны (табл. 2.12). Это свидетельствует о том, что процесс деструкции УВ протекал неоднозначно.

Таблица 2.12  
Корреляционная матрица исследуемых показателей до санации  
и после санации нефтезагрязненных грунтов по скважине 32

Показатель	Сумма УВ	$C_1$	$C_2$	Бензол	$B_1$	$B_2$	Толуол	$T_1$	$T_2$	Этилбензол	$E_1$	$E_2$	М-п-ксиол	$M_1$	$M_2$
Сумма УВ	1,00	0,19	-0,40	0,90	0,41	-0,97	0,97	-0,47	-0,99	0,95	-0,08	0,00	0,00	-0,53	0,00
$C_1$		1,00	0,61	0,04	0,95	-0,18	0,00	0,75	-0,31	0,02	0,96	0,00	0,00	0,73	0,00
$C_2$			1,00	0,19	0,70	-0,15	-0,29	0,37	0,00	0,06	0,58	0,00	0,00	0,53	0,00
Бензол				1,00	0,34	-0,97	0,83	-0,63	-0,86	0,99	-0,23	0,00	0,00	-0,61	0,00
$B_1$					1,00	-0,45	0,21	0,51	-0,51	0,31	0,84	0,00	0,00	0,52	0,00
$B_2$						1,00	-0,90	0,51	0,95	-0,99	0,09	0,00	0,00	0,52	0,00
Толуол							1,00	-0,57	-0,95	0,91	-0,24	0,00	0,00	-0,66	0,00
$T_1$								1,00	0,35	-0,64	0,90	0,00	0,00	0,98	0,00
$T_2$									1,00	-0,91	-0,05	0,00	0,00	0,42	0,00
Этилбензол										1,00	-0,25	0,00	0,00	-0,65	0,00
$E_1$											1,00	0,00	0,00	0,88	0,00
$E_2$												1,00	0,00	0,00	0,00
М-п-ксиол													1,00	0,00	0,00
$M_1$														1,00	0,00
$M_2$															1,00

#### Описание результатов по скв. 5.

По скв. 5 средние концентрации УВ достаточно высокие (см. табл. 2.3). При этом в июле 1992 г. произошло значительное увеличение концентрации, и только в сентябре процесс санации УВ прошел достаточно успешно. Необходимо отметить, что до санации коэффициент корреляции ( $r$ ) между суммарным содержанием и глубиной значимый (-0,98), затем в процессе санации он несколько снижается, но отрицательная тенденция сохраняется (см. табл. 2.4). В процессе очистки полностью уничтожены концентрации по стиролу, изомасляному альдегиду, изобутиловому спирту и 2-этилгексеналю. Наиболее слабо процесс санации наблюдается по бензолу, толуолу и метапарақсиолу. Корреляционные связи между изучаемыми компонентами до санации и в процессе ее показывают, что максимальное разрушение корреляционных связей в процессе очистки начало происходить со стирола и далее (табл. 2.13). Наблюдения показывают, что процесс уменьшения концентраций по бензолу, толуолу и этилбензолу происходит намного медленнее, чем по другим составляющим УВ.

#### Описание результатов по скв. 4.

В скв. 4 до начала санации количество углеводородов было незначительно, затем в процессе выполнения исследований, после первого этапа санации, оно резко увеличилось, после второго этапа санации оно более

Таблица 2.13

Корреляционная матрица исследуемых показателей до санации и после санации нефтезагрязненных грунтов по скважине 5

чем в три раза снизилось. Необходимо обратить внимание на многообразие направлений корреляционных связей между содержаниями УВ в почвогрунтах и глубиной (см. табл. 2.4). На этом фоне своей отрицательной направленностью выделяется связь содержания ортоксилола и глубины, которая только несколько ослабляется в процессе санации.

Суммарное содержание УВ имеет до санации значимую корреляционную связь только со стиролом, во время первой санации с бензолом, толуолом, метапараксилолом, стиролом. Во время второй санации связи с бензолом, толуолом остаются также сильными (табл. 2.14).

#### *Описание результатов по скв. 7, 8.*

Результаты исследований по скв. 7 приведены в табл. 2.2, 2.3, 2.4, 2.15. В скв. 8 до санации и в процессе санации фиксируется незначительное количество УВ с уменьшением концентраций по глубине (см. табл. 2.3, 2.4). Данная скважина интересна изменениями корреляционных связей между компонентами УВ в процессе выполнения работ (табл. 2.16). Суммарное содержание УВ до санации контролируется концентрациями бензола, толуола, этилбензола, метаксилола, масляного альдегида и стирола. В процессе первой и второй санации эти связи сохраняются. До санации в составе УВ не было ортоксилола, в июле 1992 г. после первого этапа санации он появился и также был сильно связан с суммарным содержанием УВ, как в процессе второго этапа санации. По данной скважине наиболее рельефно прослеживается, как изменяется содержание компонентов в процессе их незначительного привноса в июле, а затем некоторого разрушения в сентябре 1992 г. при небольших концентрациях менее 10 мг/100 г почвы.

#### *Описание результатов по скв. 31.*

Результаты исследований в процессе санации по скв. 31 приведены в табл. 2.2, 2.3, 2.4 и 2.17. Видно, что на общем фоне очень высоких значений коэффициентов корреляции визуально наибольшие связи наблюдаются по толуолу и ортоксилолу, при значительном сокращении высоких корреляционных связей по изомасляному альдегиду и бутиловому спирту.

Выполненный анализ свидетельствует о достаточно сложных и разнонаправленных процессах изменения УВ во времени. При этом установлено, что процессы санации наиболее интенсивно протекают при значительных концентрациях УВ, при их же снижении до 10 – 20 мг/100 г почвы интенсивность этих процессов с помощью используемых методов санации снижается (фактор времени).

#### *Описание результатов в целом.*

В данном подразделе оценим выполненные эксперименты по очистке УВ в грунтах в целом. Оценку произведем первоначально по двум этапам, а затем по способам применяемой очистки. На первом этапе очистки суммарное содержание УВ уменьшилось по скв. 19, 15, 17, 7 в интервале

Таблица 2.14

Корреляционная матрица исследуемых показателей до санации и после санации нефтезагрязненных грунтов по скважине 4

Таблица 2.15

Корреляционная матрица исследуемых показателей до санации и после санации нефтезагрязненных грунтов по скважине 7

Таблица 2.16

Корреляционная матрица исследуемых показателей до санации и после санации нефтезагрязненных грунтов по скважине 8

Таблица 2.17

Корреляционная матрица исследуемых показателей в процессе санации  
нефтезагрязненных грунтов по скв. 31

		Компоненты УВ и этапы санации																					
Компоненты УВ	Этапы санации	Суммарное содержание УВ		Бензол		Толуол		Этилбензол		М-п-ксилол		О-ксилол		Стирол		Изомасляный альдегид		Изобутиловый спирт					
		до	1	2	до	1	2	до	1	2	до	1	2	до	1	2	до	1	2				
Суммарное содержание УВ	до	1,00	0,59	0,81	0,69	0,71	<b>0,90</b>	0,71	0,57	0,62	0,73	0,77	0,66	0,71	0,83	<b>0,98</b>	0,70	0,69	0,37	0,59			
	1	1,00	<b>0,93</b>	<b>0,99</b>	<b>0,98</b>	<b>0,87</b>	-0,15	<b>1,00</b>	<b>0,93</b>	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	<b>0,92</b>	<b>0,61</b>	<b>0,91</b>	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>	0,27	0,30	0,22	0,25		
Бензол	2		1,00	<b>0,97</b>	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	0,19	0,92	<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	<b>0,94</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,89</b>	<b>1,00</b>	<b>0,80</b>	<b>0,91</b>	0,83	0,55	0,59	0,57		
	до			1,00	<b>1,00</b>	<b>0,92</b>	-0,01	<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	<b>0,69</b>	<b>0,89</b>	<b>1,00</b>	<b>0,93</b>	<b>0,98</b>	0,36	0,42		
Толуол	1			1,00	<b>0,93</b>	<b>0,94</b>	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	<b>0,99</b>	<b>1,00</b>	<b>0,94</b>	<b>0,96</b>	<b>0,71</b>	<b>0,87</b>	<b>0,99</b>	<b>0,92</b>	<b>0,97</b>	0,39	0,45			
	2			1,00	0,34	0,86	0,99	0,93	0,90	0,95	0,96	0,88	0,99	0,91	0,91	0,92	0,72	0,86	0,51	0,73	0,63		
Этилбензол	2			1,00	-0,16	0,21	0,02	-0,04	0,04	0,12	-0,10	0,22	0,65	0,02	-0,00	-0,35	-0,12	<b>0,49</b>	<b>0,88</b>	0,80	0,72		
	до			1,00	0,92	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	<b>0,91</b>	<b>0,60</b>	<b>0,89</b>	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	<b>0,99</b>	0,23	0,28	0,18	0,20	
М-п-ксилол	1				1,00	<b>0,97</b>	<b>0,95</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,92</b>	<b>1,00</b>	<b>0,83</b>	<b>0,92</b>	<b>0,97</b>	<b>0,82</b>	<b>0,91</b>	<b>0,49</b>	<b>0,62</b>	<b>0,54</b>	<b>0,55</b>	<b>0,54</b>	<b>0,55</b>	
	2					1,00	0,99	0,99	0,99	0,95	0,97	0,71	0,89	1,00	0,92	0,97	0,38	0,44	0,34	0,37	0,92	0,82	
О-ксилол	до						1,00	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,95</b>	<b>0,97</b>	<b>0,71</b>	<b>0,89</b>	<b>1,00</b>	<b>0,92</b>	<b>0,97</b>	<b>0,38</b>	<b>0,44</b>	<b>0,25</b>	<b>0,27</b>	<b>0,94</b>	<b>0,82</b>
	2							1,00	0,98	0,99	0,97	0,94	0,68	0,88	<b>0,98</b>	<b>0,94</b>	<b>0,99</b>	<b>0,28</b>	<b>0,38</b>	<b>0,25</b>	<b>0,27</b>	<b>0,94</b>	<b>0,82</b>
Стирол	1							1,00	0,99	0,98	0,73	0,92	1,00	<b>0,90</b>	<b>0,90</b>	<b>0,95</b>	<b>0,43</b>	<b>0,47</b>	<b>0,41</b>	<b>0,43</b>	<b>0,90</b>	<b>0,83</b>	
	2								1,00	0,93	0,98	0,76	0,89	0,99	<b>0,88</b>	<b>0,95</b>	<b>0,44</b>	<b>0,53</b>	<b>0,43</b>	<b>0,45</b>	<b>0,88</b>	<b>0,77</b>	
Изомасляный альдегид	до								1,00	0,90	0,68	0,93	0,93	<b>0,90</b>	<b>0,98</b>	0,13	0,35	0,21	0,20	0,90	0,85		
	2									1,00	0,83	0,92	<b>0,92</b>	<b>0,81</b>	<b>0,89</b>	<b>0,54</b>	<b>0,63</b>	<b>0,57</b>	<b>0,59</b>	<b>0,81</b>	<b>0,74</b>		
Изобутиловый спирт	1									1,00	0,75	0,68	0,39	0,63	<b>0,43</b>	<b>0,92</b>	0,77	0,70	0,39	0,30	0,33		
	2										1,00	<b>0,98</b>	0,78	0,86	0,32	<b>0,48</b>	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>	<b>0,78</b>	<b>0,84</b>	<b>0,34</b>		

отношений от 1,01 до 16,9, что составило 33% от всех исследуемых скважин. На втором этапе санации процент скважин, где уменьшились концентрации УВ, значительно увеличился (83%). Процесс очистки был эффективен по скв. 19, 15, 31, 1, 17, 2, 4, 32 и 5, при этом отношение изменилось от 1,12 до 49,7. В среднем эффективность очистки на первом этапе составила  $2,12 \pm 4,79$ , на втором  $5,59 \pm 13,90$  (табл. 2.18).

Таблица 2.18  
Осредненные статистические характеристики очистки почвогрунтов

Стадия очистки	Компоненты УВ	Статистические данные			
		Среднее значение	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
Первая	Сумма УВ	2,121667	0,080000	16,90000	4,79311
	Бензол	1,412500	0,040000	7,73000	2,15036
	Толуол	1,760833	0,100000	8,35000	2,49243
	Этилбензол	1,881667	0,100000	16,18000	4,53414
	Метапараксилол	3,458333	0,100000	13,19000	4,75835
	Ортоксилол	4,782500	0,020000	19,18000	6,13252
	Стирол	5,525000	0,110000	38,87000	11,10913
	Изомасляный альдегид	5,418333	0,200000	12,98000	4,76685
Вторая	Сумма УВ	5,699167	0,160000	49,70000	13,90308
	Бензол	2,885000	0,100000	20,58000	5,64792
	Толуол	4,368333	0,200000	30,92000	8,60282
	Этилбензол	7,990833	0,150000	65,73000	18,42516
	Метапараксилол	5,520833	0,250000	38,47000	10,79467
	Ортоксилол	9,455000	0,200000	76,09000	21,49814
	Стирол	3,321667	0,100000	10,00000	3,61345
	Изомасляный альдегид	5,288333	0,100000	10,00000	4,54553

По бензолу на первом этапе концентрации уменьшились в 41% скважин (15, 3, 1, 17, 7), на втором этапе очистка была также эффективна только в 41% скважин, но эти скважины были другие (31, 8, 4, 32, 5). По бензолу на первом этапе средняя степень очистки составила  $1,41 \pm 2,15$ , на втором этапе  $2,88 \pm 5,59$  (см. табл. 2.18).

По толуолу на первом этапе очистка была эффективна в скв. 15, 3, 1, 17, что составило 33%, на втором этапе в скв. 31, 8, 17, 4, 32 и 5. Очистка прошла эффективно по двум этапам совместно только в скв. 17. По толуолу на первом этапе средняя степень очистки составила  $1,76 \pm 2,49$ , на втором –  $4,36 \pm 8,60$  (см. табл. 2.18).

По этилбензолу на первом этапе эффективность наблюдалась только в 25% скважин (15, 8, 17), на втором этапе – в скв. 19, 15, 31, 1, 17, 4, 32 и 5. Процесс очистки не происходил в скв. 3, 2 и 7 в обоих случаях. Средняя степень очистки  $1,88 \pm 4,53$  на первом и  $7,99 \pm 18,42$  на втором этапах.

По метапараксилолу на первом этапе очистка почв от УВ произошла в 25%, а на втором - в 66% скважин. Средняя степень очистки составила на первом этапе  $3,45 \pm 4,75$ , на втором этапе  $5,52 \pm 21,49$ . Несколько лучше очистка произошла по ортоксилолу (36% - первый этап санации, 73% - второй этап санации) при средних отношениях это соответственно  $4,78 \pm 6,13$  и  $9,45 \pm 21,49$ . По стиролу - на первом этапе 30%, на втором этапе - 63% от исследуемых скважин. Процесс очистки не происходил в скв. 3, 2 и 7. Степень очистки  $4,78 \pm 11,10$  на первом этапе и  $9,45 \pm 3,61$  на втором (см. табл. 2.18).

По изомасляному альдегиду процесс очистки происходил более интенсивно, чем по вышеприведенным компонентам органических соединений, 75 и 91% соответственно на первом и втором этапах.

По другим компонентам вышеприведенный анализ выполнить невозможно из-за отсутствия достаточных статистических данных.

Нужно отметить, что процессы очистки почв от УВ практически не происходили в скв. 3 и 2.

Наиболее интенсивно процессы очистки протекали в скв. 15, 31, 1, 17, 4 и 5.

С целью определения роли отдельных компонентов в суммарной очистке рассчитаны коэффициенты корреляции между ними (табл. 2.19). Видно, что процесс очистки почвогрунтов от УВ на первом этапе санации связан с деструкцией бензола (0,95), толуола (0,81), этилбензола (0,97), ортоксилола (0,68), стирола (0,90), корреляционные связи со степенью очистки по изомасляному альдегиду слабее. На втором этапе по бензолу, толуолу, этилбензолу, метапараксилолу анализируемые связи увеличиваются, а по стиролу уменьшаются.

Также нет корреляционной связи между суммарной очисткой и очисткой по изомасляному альдегиду.

С целью познания механизма очистки нами построена многомерная статистическая модель зависимости суммарной степени очистки от степени очистки по отдельным компонентам. На первом этапе данная модель имеет следующий вид:

$$\Sigma CO = 0,89 \Sigma B + 0,27 MK - 0,19 O-K + 0,32 T - 0,15 \text{ при } r = 0,99, \quad (2.1)$$

где  $\Sigma CO$  - суммарная степень очистки;

$\Sigma B$  - степень очистки по этилбензолу;

$MK$  - степень очистки по метапараксилолу;

$O-K$  - степень очистки по ортоксилолу;

$T$  - степень очистки по толуолу.

Анализ данной связи показывает, что степень очистки по ортоксилолу на первом этапе отрицательно сказывается на суммарной степени очистки.

Таблица 2.19

Определенные результаты степени очистки

		Коэффициенты корреляции по компонентам УВ и этапам очистки															
Компоненты УВ	Этапы очистки	Сумма УВ		Бензол		Толуол		Этилбензол		М-п-ксилол		О-ксилол		Стирол		Изомасляный альдегид	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Сумма УВ	1	1,00	-0,13	<b>0,95</b>	-0,15	<b>0,81</b>	-0,17	<b>0,97</b>	-0,13	<b>0,74</b>	-0,14	<b>0,68</b>	-0,15	<b>0,90</b>	-0,28	0,53	0,25
	2	1,00	-0,12	<b>0,99</b>	-0,23	<b>0,98</b>	-0,08	<b>0,99</b>	-0,19	<b>0,96</b>	-0,25	<b>0,97</b>	-0,15	<b>0,61</b>	-0,33	0,37	
Бензол	1		1,00	-0,16	<b>0,89</b>	-0,16	<b>0,94</b>	-0,13	<b>0,65</b>	-0,11	<b>0,69</b>	-0,12	<b>0,87</b>	-0,23	0,41	0,28	
	2		1,00	-0,27	<b>0,99</b>	-0,10	<b>1,00</b>	-0,17	<b>0,97</b>	-0,25	<b>0,97</b>	-0,16	<b>0,67</b>	-0,28	0,36		
Толуол	1			1,00	-0,27	<b>0,84</b>	-0,23	<b>0,46</b>	-0,20	<b>0,77</b>	-0,20	<b>0,87</b>	-0,36	<b>0,51</b>	0,07		
	2				1,00	-0,12	<b>0,99</b>	-0,18	<b>0,95</b>	-0,27	<b>0,95</b>	-0,19	<b>0,71</b>	-0,26	0,35		
Этилбензол	1				1,00	-0,08	<b>0,62</b>	-0,08	<b>0,76</b>	-0,09	<b>0,93</b>	-0,24	<b>0,44</b>	0,37			
	2					1,00	-0,13	<b>0,98</b>	-0,21	<b>0,98</b>	-0,13	<b>0,69</b>	-0,26	0,37			
М-п-ксилол	1					1,00	-0,09	<b>0,58</b>	-0,17	<b>0,70</b>	0,05	<b>0,70</b>	0,23				
	2						1,00	-0,17	<b>0,99</b>	-0,11	<b>0,78</b>	-0,27	0,38				
О-ксилол	1						1,00	-0,22	<b>0,86</b>	-0,15	<b>0,54</b>	0,40					
	2							1,00	-0,15	<b>0,63</b>	-0,35	0,33					
Стирол	1							1,00	-0,17	<b>0,65</b>	0,30						
	2								1,00	-0,08	<b>0,38</b>						
Изомасляный альдегид	1								1,00	-0,18	<b>1,00</b>	-0,18					
	2									1,00	-0,00	<b>1,00</b>	1,00				

На втором этапе эта многомерная модель характеризуется следующим видом:

$$\Sigma CO = 2,61 B + 0,39 C - 0,51 \text{ при } r = 0,99, \quad (2.2)$$

где  $B$  – степень очистки по бензолу,  $C$  – степень очистки по стиролу.

Вид данного уравнения показывает, что очистка по бензолу на втором этапе усилилась и ослабла по стиролу.

При использовании фитоспособа на первом этапе очистки при суммарных концентрациях менее 5 мг/100 г почвы процесс очистки не происходил только в скв. 7, где концентрации были значительные. На втором этапе процесс очистки наблюдался во всех скважинах, кроме скв. 7, при среднем отношении очистки по этим скважинам, равном 2,26.

При биологическом способе очистки на первом этапе уменьшение концентрации УВ в почвогрунтах наблюдалось только в скв. 15, где концентрации УВ были значительны, в остальных скважинах, где содержание УВ было менее 16,92 мг/100 г почвы, санация не происходила.

На втором этапе процесс очистки наблюдался во всех скважинах при средней степени очистки 2,51, кроме скв. 3, где был интенсивный подток УВ извне.

При агротехническом способе наиболее интенсивная очистка произошла на втором этапе, при средней степени ее 24,9 (по двум скважинам).

Таким образом, независимо от способа очистки и концентраций УВ процесс уменьшения содержаний УВ происходит более интенсивно на втором этапе очистки.

#### **2.4. Оценка и выбор эффективных методов санации**

Рассмотрим, как протекают процессы санации в зависимости от степени загрязнения почвогрунтов углеводородами.

При биологической санации содержание УВ изменялось наиболее значительно по сравнению с другими методами, о чем свидетельствуют самые высокие коэффициенты вариации (табл. 2.20). Среднее содержание УВ варьирует в интервале от 0,36 до 195 мг/100 г почвы при среднем значении 27,29 мг/100 г почвы. Анализ значений степени очистки показывает, что максимальная степень очистки ( $CO$ ) составляет 16,9. При этом коэффициент вариации по биологической очистке составляет 1,88. Установлена значимая корреляционная зависимость между степенью очистки биологическим способом и содержанием углеводородов в почвогрунтах (УВ), которая имеет следующий вид:

$$CO = 0,089 + 0,083 UV \text{ при } r = 0,93. \quad (2.3)$$

Таблица 2.20

## Характеристики различных методов очистки

Метод и стадия очистки	Содержание УВ в грунтах, мг/100 г почвы				Степень очистки			
	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации	Интервал значений	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	Коэффициент вариации	Интервал значений
1. Биологический								
а) СО>1	27,29	54,16	1,98	0,36-195,00	2,45	4,63	1,88	0,03-16,90
б) СО<1	46,21	67,27	1,45	4,52-195,00	4,34	5,84	1,34	1,01-16,90
в) первая стадия	5,15	3,77	0,73	1,21-16,76	0,24	0,33	1,37	0,08-0,93
г) вторая стадия	40,51	75,94	1,87	1,21-195,00	2,63	6,29	2,39	0,03-16,90
	16,70	17,21	1,03	4,52-50,76	1,21	0,74	0,61	0,03-2,20
2. Агротехнический								
а) СО>1	135,13	171,47	1,27	21,46-390,00	13,72	24,01	1,75	0,20-49,71
б) СО<1	154,15	204,78	1,32	21,46-390,00	18,23	27,25	1,49	2,37-49,71
в) первая стадия	78,08	-	-	-	0,20	-	-	-
г) вторая стадия	64,84	19,56	0,30	51,01-78,68	1,21	1,53	1,26	0,20-2,37
	220,00	239,71	1,08	51,01-390,00	26,04	33,47	1,28	2,37-49,71
3. Фитологический								
а) СО>1	13,14	12,29	0,93	0,69-34,92	1,49	1,44	0,96	0,02-3,77
б) СО<1	22,43	1,77	0,79	8,98-34,92	2,64	1,09	0,41	1,40-3,77
в) первая стадия	3,85	2,52	0,65	0,69-6,68	0,34	0,36	1,05	0,02-0,87
г) вторая стадия	8,48	11,28	1,33	0,69-25,22	1,06	1,80	1,69	0,02-3,77
	17,79	12,94	0,73	6,68-34,92	1,91	1,05	0,55	0,87-3,32

*Примечание.* СО – показатель, характеризующий степень очистки почвогрунтов. Это отношение содержания УВ в почвогрунтах после санации или после очередной ее стадии к содержанию УВ в почвогрунтах до начала санации или очередной ее стадии.

Следует отметить, что данное уравнение можно использовать для прогноза степени очистки или содержания УВ в почвогрунтах в условиях, приближенных к условиям проведенного эксперимента: климатические условия средней полосы России и время санации (май-сентябрь).

В том случае, когда процесс очистки происходит ( $CO > 1$ ), среднее значение содержания углеводородов в почвогрунтах и коэффициент вариации несколько выше, чем в том случае, когда процесс очистки не про текает ( $CO < 1$ ).

Установлена значимая корреляционная связь в случае  $CO > 1$ :

$$CO = 0,609 + 0,081 UV. \quad (2.4)$$

Эта модель прогноза работает в тех же условиях, которые описаны для предыдущего уравнения.

В случае, когда грунты биологическим способом не очищаются ( $CO < 1$ ) среднее значение УВ значительно ниже, коэффициент вариации меньше и корреляционная связь между CO и УВ не значима ( $r = 0,41$ ).

Процесс очистки осуществлялся в две стадии: в мае-июле и июль-сентябрь.

На первой стадии была достигнута средняя степень очистки 2,63 при максимальном коэффициенте вариации на фоне высоких концентраций УВ (40,51 мг/100 г почвы). Санация на первой стадии описывается следующим уравнением:

$$CO = -0,536 + 0,089 UV \text{ при } r = 0,99. \quad (2.5)$$

На второй стадии биологической очистки снижается среднее содержание УВ до 16,70 мг/100 г почвы и уменьшается коэффициент вариации и полностью отсутствует корреляционная зависимость между CO и УВ ( $r = -0,06$ ), что, видимо, свидетельствует о том, что при концентрации УВ менее 10-15 мг/100 г почвы биологическим способом УВ разлагаются недостаточно интенсивно, степень их разрушения растянута во времени.

Математическая модель, описывающая эффективность санации (снижение содержания углеводородов в почвогрунтах) во времени следующая:

$$UV = 30,229 - 2,579 T \text{ при } r = -0,31, t_p < t_t, \quad (2.6)$$

где  $T$  – время в месяцах.

Данная связь не значимая, но знак минус свидетельствует о том, что процесс санации происходит, т.е. содержание углеводородов в грунтах со временем уменьшается. По данной зависимости ориентировочное время полного разрушения УВ биологическим способом составит 11,7 месяца.

При агротехническом способе очистки при высоких концентрациях УВ (см. табл. 2.20) наблюдается достаточно высокая степень очистки.

В случае, когда  $CO > 1$ , существует значимая корреляционная связь между изучаемыми показателями и она имеет следующий вид:

$$CO = -2,21 + 0,133 \text{ УВ при } r = 0,99, t_p < t_t . \quad (2.7)$$

При данном способе санации значительный эффект наблюдается во второй стадии при достаточно высоких, средних содержаниях УВ (220,00 мг/100 г почвы) и вариациях (1,08). Средняя степень очистки достигает 26,04.

**Фитологический способ** очистки осуществлялся при невысоких средних концентрациях УВ (13,14 мг/100 г почвы) и незначительных вариациях (0,93). В случае, когда  $CO > 1$ , при средних концентрациях УВ порядка 20 мг/100 г почвы установлена связь между CO и УВ следующего вида:

$$CO = 0,751 + 0,084 \text{ УВ при } r = 0,83, t_p < t_t . \quad (2.8)$$

При снижении концентраций в 5-7 раз ( $CO < 1$ ) процесс очистки фитологическим способом не происходит. На первой стадии санации при незначительных концентрациях УВ процесс санации идет достаточно слабо (среднее значение CO равно 1,06), на второй стадии, при увеличении концентраций УВ, при некотором снижении коэффициента вариации эффективность процесса санации значительно повышается.

Таким образом, разработаны математические модели, описывающие эффективность очистки в зависимости от уровня первоначального содержания УВ в почвогрунтах. Установлена общая закономерность, связывающая снижение концентрации УВ в почвогрунтах с продолжительностью санации.

В табл. 2.21 приведены осредненные данные по очистке нефтезагрязненной территории биологическим, агротехническим и фитологическим способами. Данные показывают, что в среднем при концентрациях порядка 40 мг/100 г почвы и очень высокой вариации (2,07) средняя степень очистки составляет 3,94. Очистка описывается регрессионной моделью, приведенной в табл. 2.21, при значимом коэффициенте корреляции.

На первой стадии очистки в случае, когда  $CO > 1$ , средние концентрации УВ выше, чем в общем среднем случае, коэффициенты вариации снижаются и наблюдается повышение средней степени очистки. Зависимость между CO и УВ для этого случая приведена в табл. 2.21, и она является статистически значимой.

На второй стадии очистки в случае, когда  $CO > 1$ , средние концентрации УВ ниже, чем на первой стадии, коэффициенты вариации - выше, средняя степень очистки ниже. Зависимость между CO и УВ для этого случая приведена в табл. 2.21, и она также является статистически значимой.

Таблица 2.21

## Характеристика процессов очистки

№ п/п	Степень очистки - CO	Содержание УВ, мг/100 г почвы - УВ	Уравнение регрессии	
			В целом по очистке	
1	$\frac{3,94 \pm 10,12; 2,56}{0,02 - 49,71}$		$CO = -0,7550 + 0,11747 \text{ УВ}, r = 0,96$	
2	$\frac{6,83 \pm 12,99; 1,90}{1,01 - 49,71}$		$CO = -0,6981 + 0,12041 \text{ УВ}, r = 0,97$	Первая стадия очистки при $CO > 1$
3	$\frac{0,30 \pm 0,32; 1,06}{0,02 - 0,93}$		$CO = 0,30999 - 0,0006 \text{ УВ}, r = -0,04$	Первая стадия очистки при $CO < 1$
4	$\frac{5,64 \pm 13,32; 2,36}{0,03 - 49,71}$		$CO = -0,3187 + 0,12703 \text{ УВ}, r = 0,99$	Вторая стадия очистки при $CO > 1$
5	$\frac{2,01 \pm 4,60; 2,28}{0,02 - 16,19}$		$CO = -0,3335 + 0,07696 \text{ УВ}, r = 0,91$	Вторая стадия очистки при $CO < 1$

*Примечание.* В числителе первая цифра – среднее значение, вторая – среднеквадратичное отклонение, третья – коэффициент вариации, в знаменателе – интервал значений.

На первой и второй стадии при  $\text{CO} < 1$ , когда количество УВ в процессе очистки не уменьшается (в основном, когда концентрация УВ меньше 10-30 мг/100 г. почвы), нарушается взаимосвязь между СО и УВ.

По обобщенным результатам наблюдаются высокие корреляционные связи между СО и УВ на обеих стадиях очистки, что свидетельствует о достаточно высокой универсальности предлагаемых методов очистки.

С целью изучения изменения УВ во времени нами построена осредненная регрессионная модель, которая имеет вид

$$\text{УВ} = 44,796 - 2,498 T \text{ при } r = -0,85, t_p < t_t, \quad (2.9)$$

где  $T$  - время санации в месяцах.

Анализ этой временной модели показал, что содержание УВ равно нулю, когда продолжительность санации составляет 17,9 месяца. К сожалению, по агротехническому и фитологическому методам санации построение временных моделей не представляется возможным из-за отсутствия достаточных для статистической обработки данных и большой вариации имеющихся данных.

Полученные результаты экспериментов по санации почв, загрязненных УВ до 390 мг/100 г почвы, позволяют предложить следующую последовательность работ:

- а) на первом этапе использовать агротехнический способ, как самый эффективный и дешевый;
- б) на втором этапе, в случае неполучения агротехническим способом необходимого эффекта, следует применить биологическую санацию;
- в) на третьем этапе для доочистки почвогрунтов использовать фитологическую санацию.

По уравнениям регрессии, приведенным в табл. 2.4, нами проанализированы глубины, на которых как суммарные концентрации УВ, так и концентрации отдельных компонентов равны нулю ( $h_0$ ). По этим данным определены средние значения, стандарт и интервалы как по величине  $h_0$ , так и по коэффициенту корреляции между концентрацией и глубиной ( $r'$ ). Эти данные приведены в табл. 2.22 и на рис. 2.15. Проанализируем полученные данные первоначально по суммарным концентрациям УВ, а затем по отдельным компонентам.

До выполнения санации величина  $h_0$  изменялась в значительном интервале при среднем значении 0,51, при этом 41,6% всех данных соответствует нулевой концентрации, которая находится на глубинах 0,4 – 0,5 м.

Наблюдается отсутствие корреляционной связи между  $h_0$  и средней концентрацией ( $r = 0,23$ ) и наличием связи со значением  $r'$ :

$$h_0 = 0,31 - 0,30 r' \text{ при } r = -0,67. \quad (2.10)$$

Таблица 2.22

## Некоторые статистические характеристики санации углеводородов

Этапы санации	Суммарное содержание УВ	Бензол	Толуол	Этилбензол	Метапараскилол	Орто-ксилол	Стирол	Изомасляный альдегид	Масляный альдегид	Изобутиловый спирт
До санации	<u>0,51±0,25</u> 0,14-0,96	<u>0,59±0,41</u> 0,09-1,64	<u>0,50±0,33</u> 0,06-1,24	<u>0,50±0,21</u> 0,17-0,87	<u>0,53±0,23</u> 0,25-1,01	<u>0,57±0,30</u> 0,23-0,95	<u>0,47±0,22</u> 0,23-0,82	<u>0,60±0,37</u> 0,23-1,35	<u>0,56±0,31</u> 0,23-0,89	<u>0,59±0,23</u> 0,30-0,86
Первая санация	<u>0,26±0,18</u> -0,14-0,53	<u>0,26±0,27</u> -0,04-0,71	<u>0,31±0,34</u> -0,53-0,93	<u>0,49±0,63</u> 0,02-2,45	<u>0,23±0,25</u> -0,38-0,61	<u>0,30±0,29</u> -0,007-1,06	<u>0,10±0,88</u> -2,40-0,93	<u>0,22±0,09</u> 0,08-0,37	<u>0,31±0,12</u> 0,12-0,50	<u>0,38±0,11</u> 0,28-0,54
Вторая санация	<u>0,26±0,27</u> -0,28-0,60	<u>0,24±0,22</u> -0,05-0,67	<u>0,13±0,31</u> -0,47-0,67	<u>0,49±0,23</u> 0,16-0,99	<u>0,31±0,38</u> -0,43-0,61	<u>0,43±0,31</u> 0,08-1,25	<u>0,35±0,26</u> 0,09-0,78	<u>0,11±0,36</u> -0,41-0,58	<u>0,26±0,17</u> 0,08-0,55	<u>0,44±0,24</u> 0,25-0,72
Коэффициент корреляции между концентрацией УВ и глубиной отбора проб										
До санации	<u>-0,55±0,56</u> -0,98-0,83	<u>-0,57±0,58</u> -0,99-0,89	<u>-0,50±0,64</u> -0,99-0,78	<u>-0,56±0,57</u> -0,98-0,69	<u>-0,73±0,25</u> -0,94-0,22	<u>-0,66±0,39</u> -1,00-0,35	<u>-0,60±0,42</u> -0,96-0,31	<u>-0,69±0,40</u> -0,99-0,09	<u>-0,77±0,98</u> -0,97-0,27	<u>-0,76±0,31</u> -0,99-0,30
Первая санация	<u>-0,002±0,60</u> -0,77-0,94	<u>-0,03±0,65</u> -0,78-0,99	<u>-0,32±0,61</u> -0,99-0,98	<u>-0,28±0,61</u> -0,97-0,92	<u>-0,058±0,61</u> -0,75-0,84	<u>-0,09±0,64</u> -0,93-0,74	<u>0,00±0,64</u> -0,78-0,90	<u>0,07±0,65</u> -0,78-0,94	<u>-0,28±0,55</u> -0,88-0,65	<u>-0,042±0,33</u> -0,48-0,33
Вторая санация	<u>-0,12±0,64</u> -0,86-0,99	<u>0,068±0,69</u> -0,77-0,99	<u>0,25±0,61</u> -0,62-0,95	<u>-0,48±0,43</u> -0,86-0,49	<u>-0,16±0,49</u> -0,80-0,91	<u>-0,27±0,57</u> -0,92-0,86	<u>0,01±0,58</u> -0,87-0,96	<u>0,02±0,73</u> -0,86-0,93	<u>0,08±0,66</u> -0,75-0,95	<u>-0,05±0,75</u> -0,92-0,47

*Примечание.* В числителе – среднее значение и среднеквадратичное отклонение, в знаменателе – интервал значений.

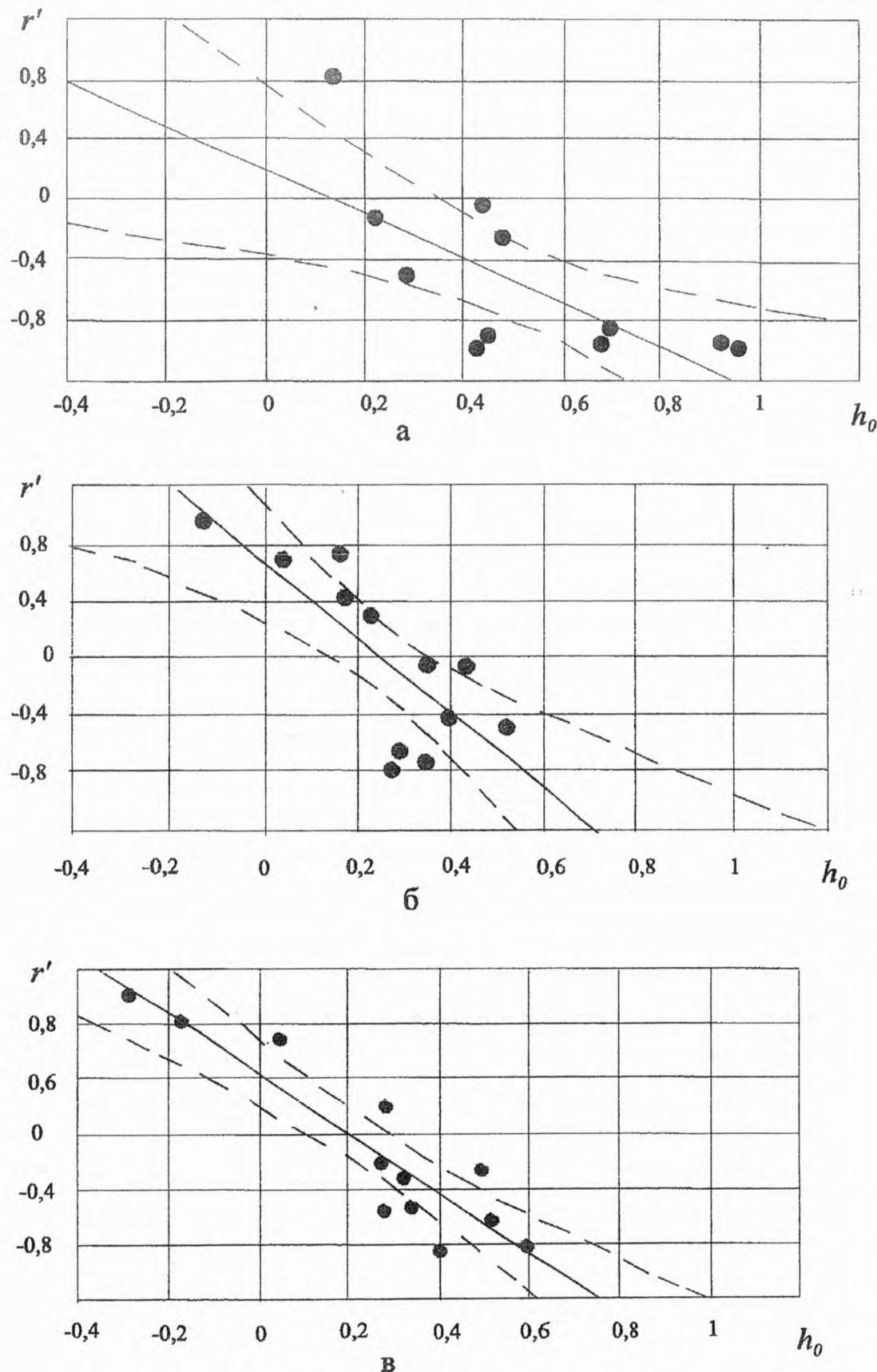


Рис. 2.15. График изменения соотношений  $h_0$  и  $r'$ : а - до санации; б - после первого этапа; в - после второго этапа санации

Анализ связей между глубиной отбора проб и концентрацией в них УВ показывает, что обратные связи наблюдаются в 0,83%, при этом, что очень важно, значение  $r'$  в интервале от -0,8 до -1,0 встречается в 58% случаев. Средний коэффициент корреляции равен -0,55 (см. табл. 2.22).

Кроме этого, нами выполнена оценка эффективности очистки с учетом установленных особенностей распределения ароматических УВ по глубине. В качестве критериев оценки эффективности санации использовались две характеристики. Первая – глубина, на которой содержание углеводородов (как суммы, так и отдельных составляющих) равно нулю. Данная величина определялась путем расчетов по регрессионным моделям, приведенным в табл. 2.4. В качестве второго критерия использовались числовые значения коэффициентов корреляции между содержанием углеводородов в грунтах и глубиной их залегания ( $r'$ ). По первой величине учитывается конечное (при обратной зависимости) или начальное (прямая зависимость) значение глубины залегания грунтов, где ароматические УВ отсутствуют, а вторая величина характеризует изменение состояния УВ с глубиной во время санации.

После проведения первой санации средняя величина  $h_0$  уменьшилась в 2 раза и составила 0,26 (см. табл. 2.22), при этом нарушилась связь  $r'$  ( $r = 0,002$ ), но связь между  $h_0$  и  $r'$  сохранилась и даже несколько усилилась:

$$h_0 = 0,26 - 0,23 r' \text{ при } r = -0,77. \quad (2.11)$$

Анализ величины  $r'$  показывает, что количество отрицательных связей уменьшилось до 58,3%, при некотором снижении интервала варьированная максимальная отрицательная связь меньше -0,8 при среднем коэффициенте корреляции -0,002 (см. табл. 2.22).

При второй санации средняя величина  $h_0$  равна 0,26 (см. табл. 2.22), при этом соотношение между положительными и отрицательными значениями коэффициента  $r'$  практически не изменилось. Также наблюдается корреляционная связь между  $h_0$  и  $r'$ . Уравнение регрессии в данном случае имеет следующий вид:

$$h_0 = 0,21 - 0,37 r' \text{ при } r = -0,90. \quad (2.12)$$

Нами построено суммарное корреляционное поле между  $h_0$  и  $r'$ , приведенное на рис. 2.16, по которому видно, что независимо от типа санации существует значимая корреляция между  $h_0$  и  $r'$ . Анализ данного поля показывает, что при отрицательных значениях  $r'$  можно определить реальные прогнозируемые значения глубин, до которых нужно выполнить санацию (случай, когда наблюдается уменьшение концентраций углеводородов вниз по разрезу почв), если значения  $r'$  положительны, то это зна-

чит, что в процессе санации эти связи ослабляются до глубины  $h_0 > 0$ , при  $h_0 < 0$  наблюдается увеличение концентраций углеводородов с глубиной.

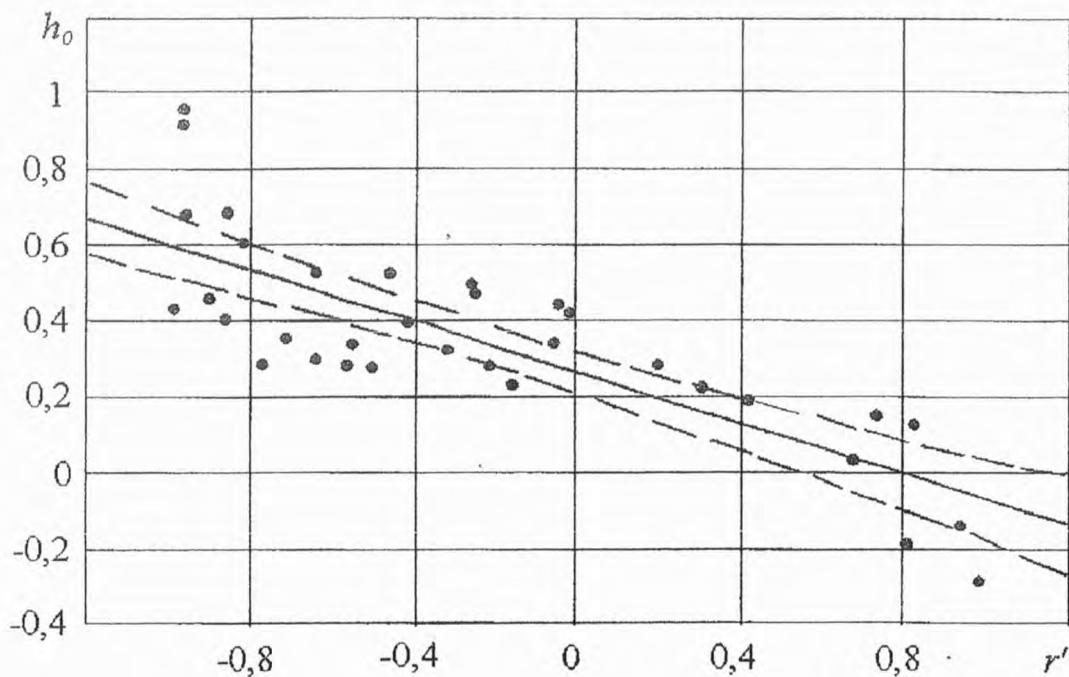


Рис. 2.16. Корреляционное поле между  $h_0$  и  $r'$

В этом случае глубина необходимой санации должна быть определена дополнительно, для чего нужно отобрать пробы с большими глубинами, чем было выполнено ранее.

Аналогичный анализ выполнен по отдельным составляющим ароматических УВ. По бензолу значение  $h_0$  в процессе санации значительно снизилось при изменении величины  $r'$  аналогично вышеописанному по суммарным концентрациям (см. табл. 2.22). Необходимо отметить, что наблюдается усиление связи между  $h_0$  и  $r'$  до санации и в процессе санации от  $-0,55$  до  $-0,90$ .

По толуолу наблюдается последовательное уменьшение средних значений по  $h_0$  от  $0,50$  м до санации до  $0,13$  м после второй санации (см. табл. 2.22).

Кроме этого, значение  $r'$  в процессе санации изменяется не так резко, как в случае с бензолом ( $-0,50; -0,32; 0,25$ ). Корреляционные связи между  $h_0$  и  $r'$  в процессе санации варьируются незначительно ( $-0,55; -0,71; -0,67$ ).

Процесс санации по этилбензолу проходит достаточно сложно: как до санации, так и в процессе ее величины  $h_0$  и  $r'$  изменяются незначительно (см. табл. 2.22).

По метапараксилолу значение  $h_0$  в процессе санации сильно снижается, значительно изменяется и величина  $r'$ , при этом происходит последовательное значительное ослабление корреляционной связи между  $h_0$  и  $r'$  ( $-0,38; -0,68; -0,81$ ).

По ортоксилолу уменьшение значений  $h_0$  происходит незначительно, но величина  $r'$  в процессе санации изменяется достаточно сильно (см. табл. 2.22). Корреляционные связи между  $h_0$  и  $r'$  изменяются в интервале от  $-0,41$  (вторая санация) до  $-0,74$  (первая санация), до санации  $-0,69$ .

По стиролу на первом этапе санации средняя величина  $h_0$  значительно снизилась, величина  $r'$  также меняется (см. табл. 2.22). Особенностью по данному соединению является то, что корреляционные связи между  $h_0$  и  $r'$  практически одинаковы, как до санации  $-0,54$ , так и в процессе ее ( $-0,60; -0,62$ ).

Аналогичные изменения наблюдаются по изомасляному и масляно-му альдегидам и изобутиловому спирту (см. табл. 2.22).

На рис. 2.17 приведены зависимости между  $h_0$  и  $r'$  по отдельным углеводородам до санации, в процессе первой и второй санаций. Анализ корреляционного поля до санации показывает наличие отрицательной связи ( $r = -0,52$ ), при этом же визуально выделяются два поля точек. Первое – при повышенных значениях величин  $h_0$  и высоких коэффициентах  $r'$  (изомасляный альдегид, изобутиловый спирт, масляный альдегид, ортоксилол и метапараксилол), второе – при меньшей глубине  $h_0$  и менее высоких значениях  $r'$  (стирол, этилбензол, толуол). Бензол в данном корреляционном поле занимает промежуточное место. При этом необходимо отметить, что значения  $h_0$  в интервале от  $0,47$  до  $0,60$ , а  $r'$  от  $-0,77$  до  $-0,49$ .

После проведения первой санации связь между  $h_0$  и  $r'$  несколько усилилась ( $r = -0,61$ ), но уменьшился интервал значений как по  $h_0$ , так и по  $r'$ .

При первой санации по  $h_0$  в интервале от  $0,12$  до  $0,50$  м появились достаточно слабые, но положительные тенденции ( $r'$  от  $-0,32$  до  $+0,007$ ). При этом местоположение отдельных ароматических УВ относительно друг друга принципиально изменилось. Особенно это хорошо графически видно по толуолу, хотя с ним произошли наименьшие изменения как по глубине  $h_0$ , так и по величине  $r'$ . А реально положение в корреляционном поле УВ остальных ароматических УВ по данным характеристикам изменилось еще более значительно.

При второй санации произошли еще более значительные изменения во взаимном расположении отдельных ароматических УВ и усиление корреляции между  $h_0$  и  $r'$  ( $r = -0,79$ ).

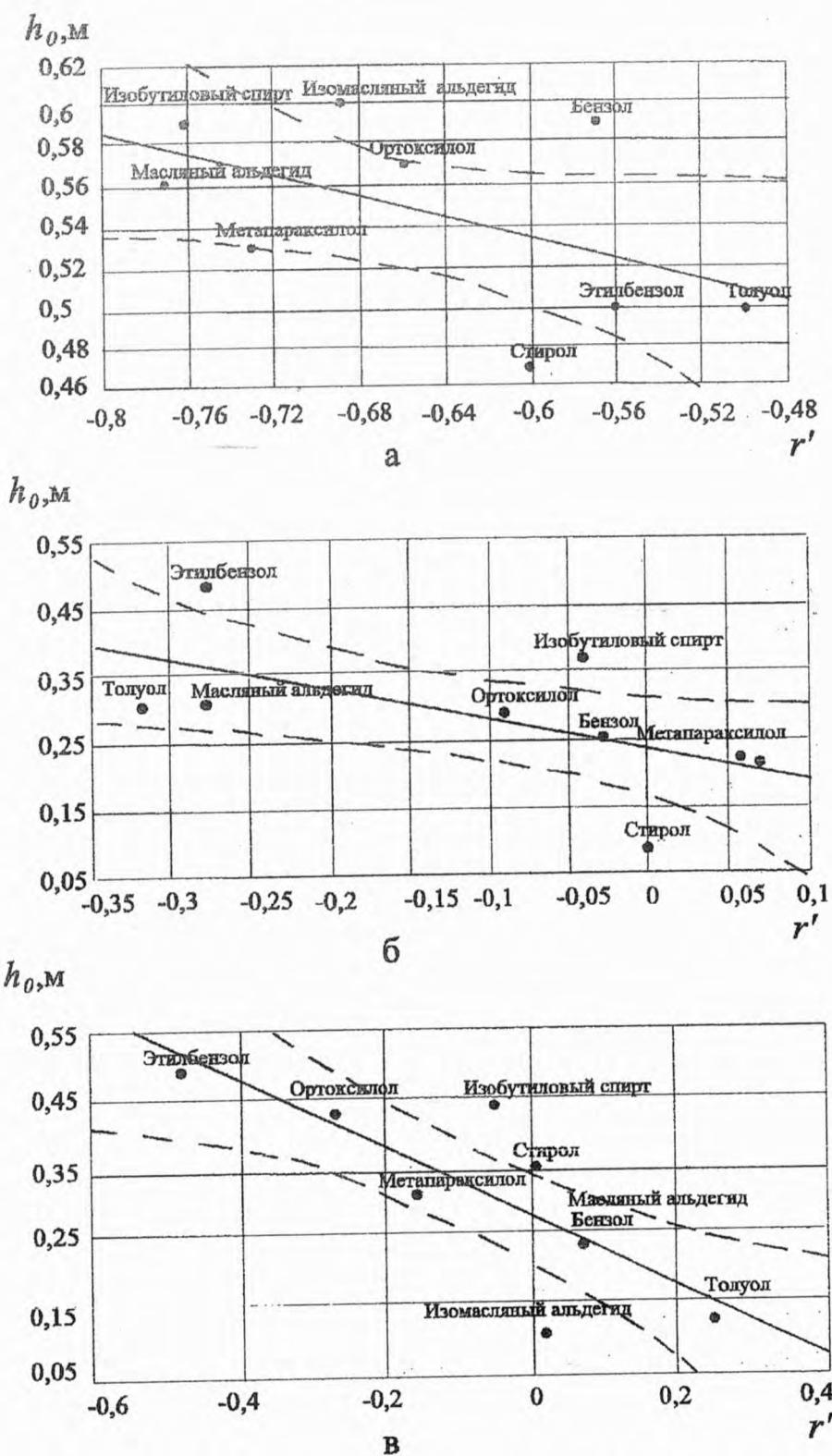


Рис. 2.17. Изменение соотношения значений  $h_0$  и  $r'$  для ароматических углеводородов в процессе санации:  
 а - до санации,  $h = 0,37 - 0,25r', r = -0,52$ ;  
 б - 1-я санация,  $h = 0,24 - 0,43r', r = -0,61$ ;  
 в - 2-я санация,  $h = 0,27 - 0,49r', r = -0,79$ ;  $t_p > t_t$

Анализ рис. 2.17 наглядно свидетельствует о значительном изменении величин  $h_0$  и  $r'$  в процессе санации грунтов от ароматических углеводородов.

На рис. 2.18 показано, как изменяются в процессе санации координаты  $h_0$  и  $r'$  по отдельным углеводородам. В целом видно, что в процессе санации величины  $h_0$  и  $r'$  закономерно снижаются, что было описано выше, но характер проходящих изменений для различных ароматических УВ различен. По бензолу происходит направленное уменьшение значений по  $h_0$  и ослабление отрицательных связей между количеством УВ, содержащихся в грунтах, и глубиной их залегания. При этом значительные изменения происходят в величинах до начала санации и на первом этапе санации (см. рис. 2.18). По толуолу изменения происходят на первом и втором этапе санации практически равномерно по  $h_0$  и более интенсивно по величине  $r'$ .

По этилбензолу процесс санации как по глубине, так и по  $r'$  практически не наблюдается (см. рис. 2.18). По метапараксилолу на первом этапе санация произошла достаточно эффективно, на втором несколько снизилась. Аналогичным был процесс санации и по ортооксилолу.

По стиролу на первом этапе санация была более эффективной по сравнению со вторым (см. рис. 2.18). Санация по изомаслянному альдегиду прошла достаточно успешно, особенно по величине  $h_0$ . По маслянному альдегиду снижение величин  $h_0$  и  $r'$  наблюдается на обоих этапах санации. Результаты санации по изобутиловому спирту показывают, что она протекала не так интенсивно, как по другим изучаемым органическим УВ соединениям.

В результате анализа вышеописанных изменений можно выделить три группы ароматических УВ с точки зрения их разрушения во времени и по разрезу изучаемых грунтов.

В первую группу, характеризующуюся уменьшением глубин и ослаблением связи между содержанием УВ и их расположением по разрезу, входят: бензол, толуол и масляный альдегид.

Для второй группы характерна эффективность санации на первом этапе и снижение ее на втором (метапараксилол, ортооксилол, изобутиловый спирт, стирол, изомасляный альдегид).

К третьей группе относится этилбензол, по которому санация практически не наблюдается.

В табл. 2.23 приведены значения  $h_0$  и  $r'$  в зависимости от метода и этапа санации.

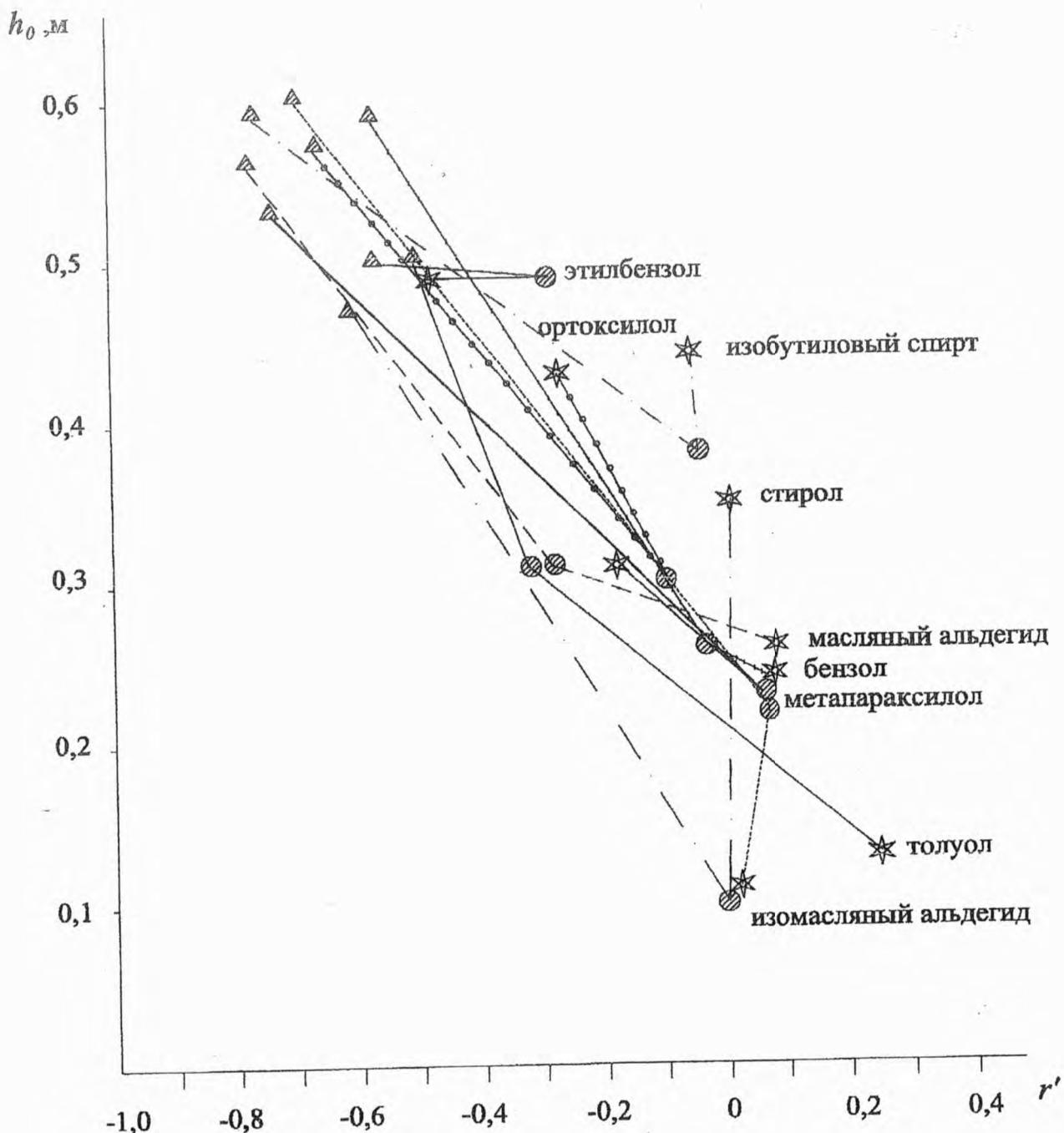


Рис. 2.18. Изменение  $h_0$  и  $r'$  в процессе санации

Условные обозначения:

$\triangleleft$  - до санации;  $\odot$  - первая санация;  $\star$  - вторая санация

Таблица 2.23

Некоторые статистические характеристики  
эффективности санации по методам

Метод и этап санации	Глубина, на которой концентрации УВ равны нулю	Коэффициент корреляции между концентрацией и глубиной отбора проб
Биологический: до санации 1-я санация 2-я санация	$0,57 \pm 0,56$	$-0,80 \pm 0,71$
	$0,16 \pm 0,14$	$0,39 \pm 1,16$
	$0,22 \pm 0,67$	$-0,09 \pm 1,67$
Фитологический: до санации 1-я санация 2-я санация	$0,37 \pm 0,26$	$-0,10 \pm 1,29$
	$0,31 \pm 0,15$	$-0,28 \pm 0,88$
	$0,25 \pm 0,52$	$-0,12 \pm 1,20$
Агротехнический: до санации 1-я санация 2-я санация	$0,51 \pm 0,45$	$-0,5 \pm 0,32$
	$0,26 \pm 0,12$	$-0,58 \pm 0,17$
	$0,40 \pm 0,16$	$-0,21 \pm 0,64$

При санации биологическим методом величина  $h_0$  уменьшилась на первом этапе более чем в 3,5 раза, при значительном изменении величин  $r'$  (от  $-0,80$  до  $0,39$ ). Фитологический метод санации менее эффективный, чем биологический, как по  $h_0$ , так и по  $r'$ . При санации агротехническим методом величина  $h_0$  несколько снизилась, а значительного уменьшения величины  $r'$  удалось добиться только после второго этапа санации.

На рис. 2.19 приведены результаты изменения величин  $h_0$  и  $r'$  в процессе санации биологическим, фитологическим и агротехническим методами. По биологическому методу во всех трех случаях наблюдаются отрицательные зависимости между  $h_0$  и  $r'$ . До санации значение  $h_0$  всегда больше нуля, а  $r'$  меньше нуля. В процессе проведения первой санации у  $h_0$  появляются отрицательные (не реальные) значения, а у  $r'$  достаточно много (66,6%) положительных значений.

При второй санации биологическим методом значительных изменений не наблюдается. По фитологическому способу до санации все значения  $h_0$  положительны, а  $r'$  в 3 случаях из 4 отрицательные, наблюдаются обратные тенденции между  $h_0$  и  $r'$ . В процессе первого этапа санации наблюдается отсутствие связи между  $h_0$  и  $r'$  (см. рис. 2.19). На втором этапе у  $h_0$  одно отрицательное значение, а у  $r'$  одно положительное. При агротехническом способе также имеются изменения в значениях  $h_0$  и  $r'$  в процессе санации (см. рис. 2.19).

Второй этап санации

Первый этап санации

До санации

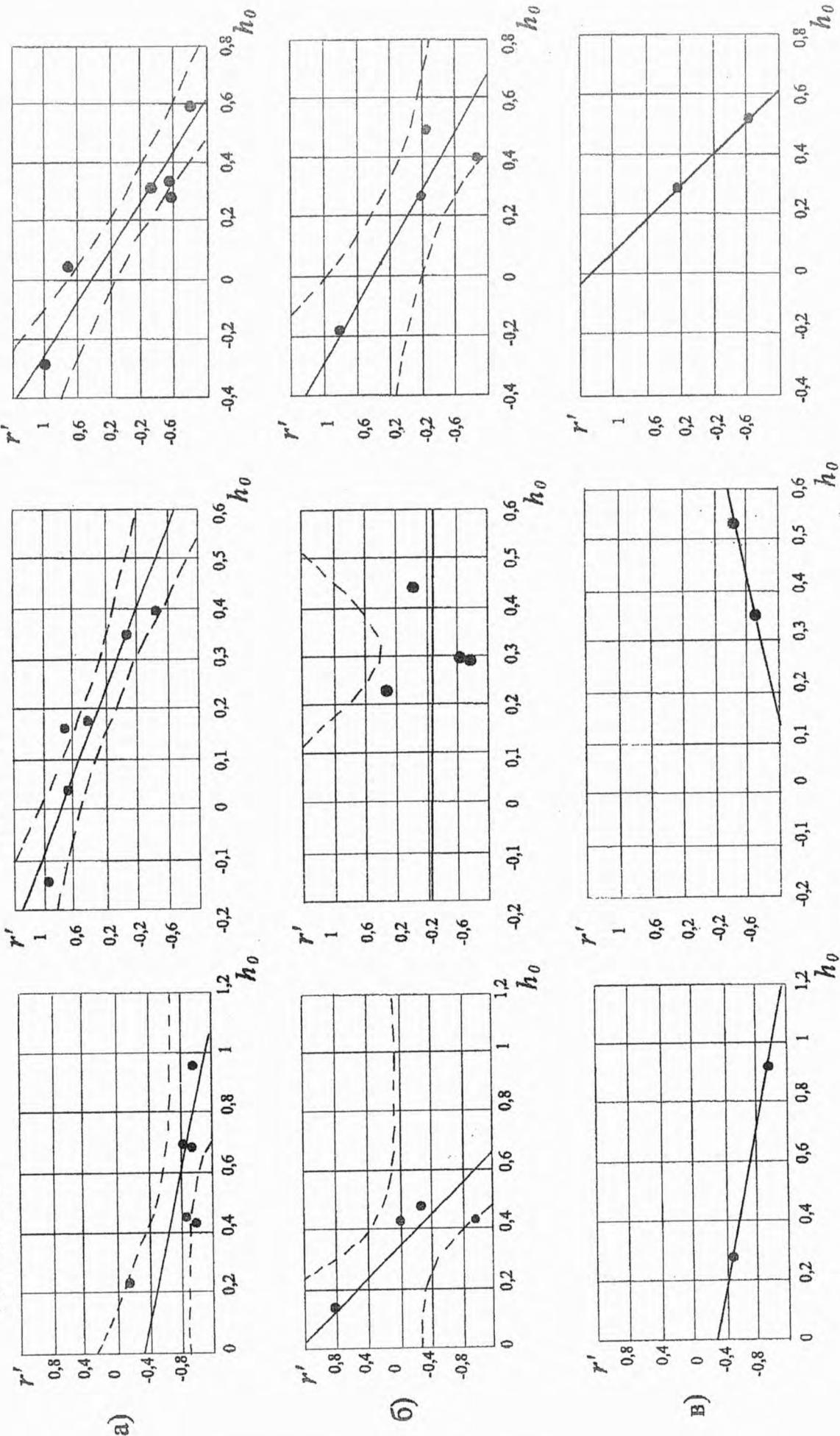


Рис. 2.19. Изменение значений  $h_0$  и  $r'$  в процессе санации  
биологическим (а), фитологическим (б), агротехническим (в) способами

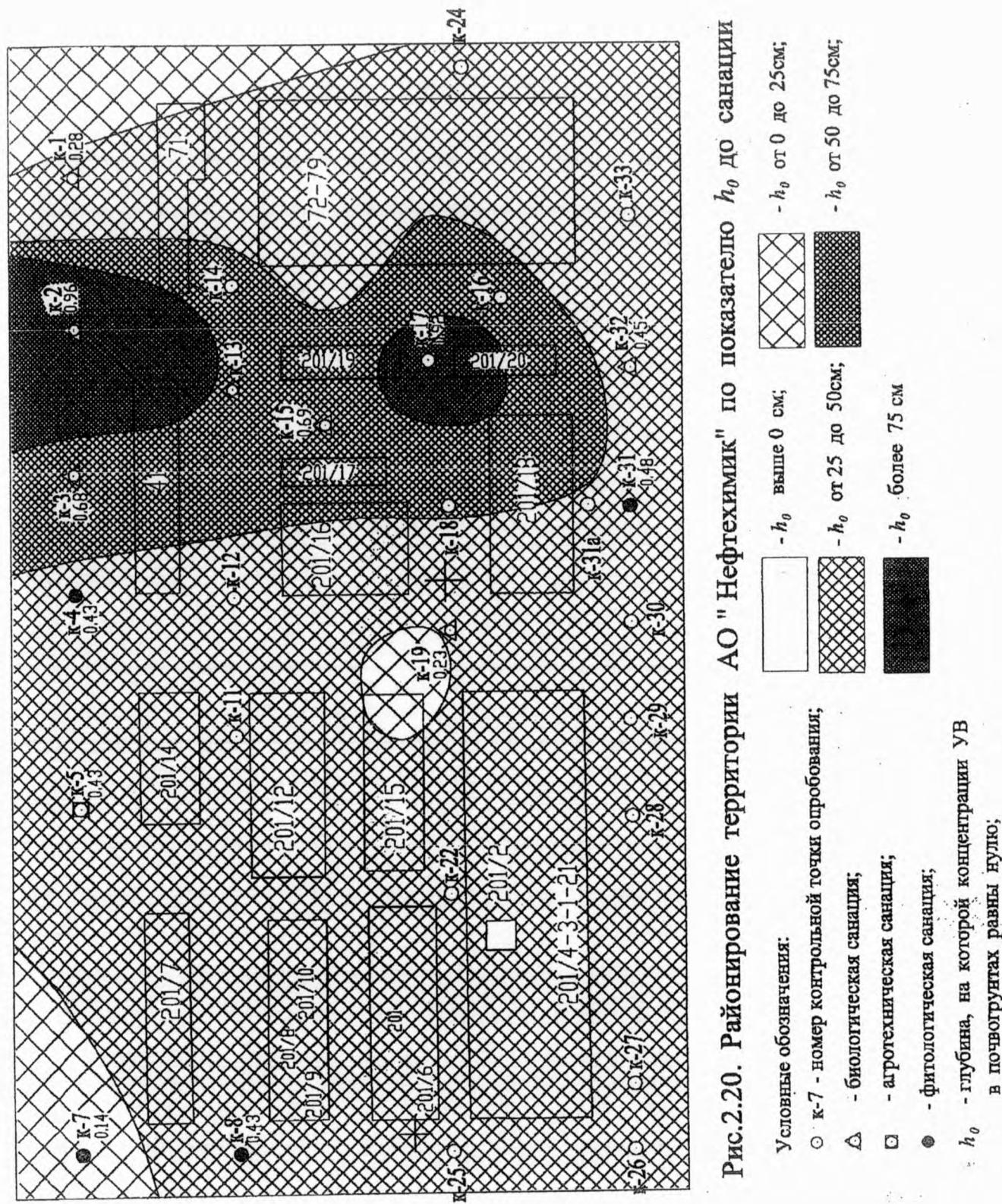
Таким образом, построенные вероятностно-статистические модели изменения концентраций УВ по разрезу изучаемых грунтов, а также их изменения во времени, в том числе и по этапам и по методам санации, показывают, что эффективность санации достаточно высока.

По найденным значениям  $h_0$  и  $r'$  были построены схемы распределения данных величин по площади до санации и в процессе ее. До санации максимальные глубины, где концентрации равны нулю, располагаются в районе скв. к-2 и к-17, процент данных глубин от всей площади исследований составляет 6% (рис. 2.20). Значения максимальных глубин  $h_0$  в западном, восточном и южном направлениях закономерно снижаются. Необходимо отметить, что интенсивность снижения более значительна в восточном направлении, чем в западном. По площади глубины в интервале от 0,5 до 0,75 м занимают 15% всей площади исследований, в интервале 0,5–0,25 м – 72%, в интервале 0–0,25 м – только 7%. Эти данные свидетельствуют о том, что максимальную площадь занимают глубины  $h_0$  в интервале 0,25–0,50 м.

В процессе первой санации карта распределения  $h_0$  по площади значительно изменилась (рис. 2.21). Во-первых, на всей площади исследований нет значений  $h_0$  более 0,75, во-вторых, в два раза сократилась по площади глубина  $h_0$  в интервале от 0,5 до 0,75 м, находится она на юге территории. И самое важное заключается в том, что значительно увеличилась площадь с глубиной  $h_0$  от 0 до 0,25 м и составляет 31%.

После проведения второй санации наблюдаются некоторые изменения в распределении  $h_0$  после первой санации (см. рис. 2.21, 2.22), но нужно отметить, процесс санации не происходил в районе скв. к-2.

В табл. 2.24 приведены результаты изменения площади по  $h_0$  и  $r'$  в процессе санации. Характер изменения величины  $r'$  по площади до санации показывает, что максимальные отрицательные связи, в основном, наблюдаются территориально там, где наибольшие значения  $h_0$ , при близком аналогичном ослаблении этих связей (рис. 2.23). Площадь, где эти связи от минусовых до нулевых имеют максимальное распространение, составляет 15% от всей площади исследований (табл. 2.24). После проведения первой санации характер распределения значений  $r'$  резко изменился, при этом значительно уменьшилась площадь (0,1%), где фиксируются отрицательные связи более –0,75 (рис. 2.24). В районе скв. к-1 наблюдается сильная положительная корреляционная зависимость. Необходимо отметить, что площадь, где корреляционные связи 0 – 0,75, практически увеличилась в два раза и составляет 67,9% (см. табл. 2.24).



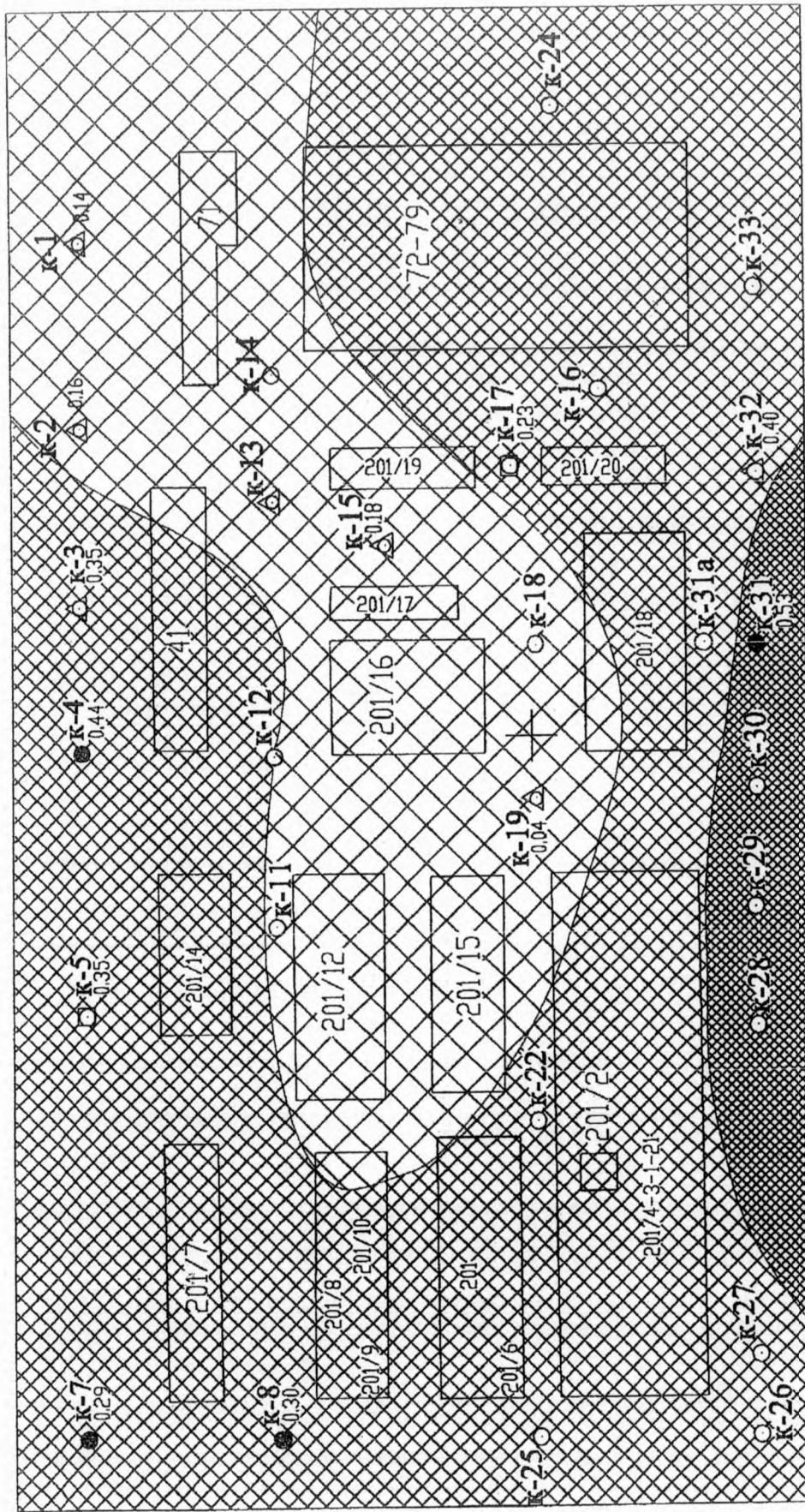


Рис.2.21. Районирование территории АО "Нефтехимик" по показателю  $h_o$  после первого этапа санации

Условные обозначения см. на рис. 2.20

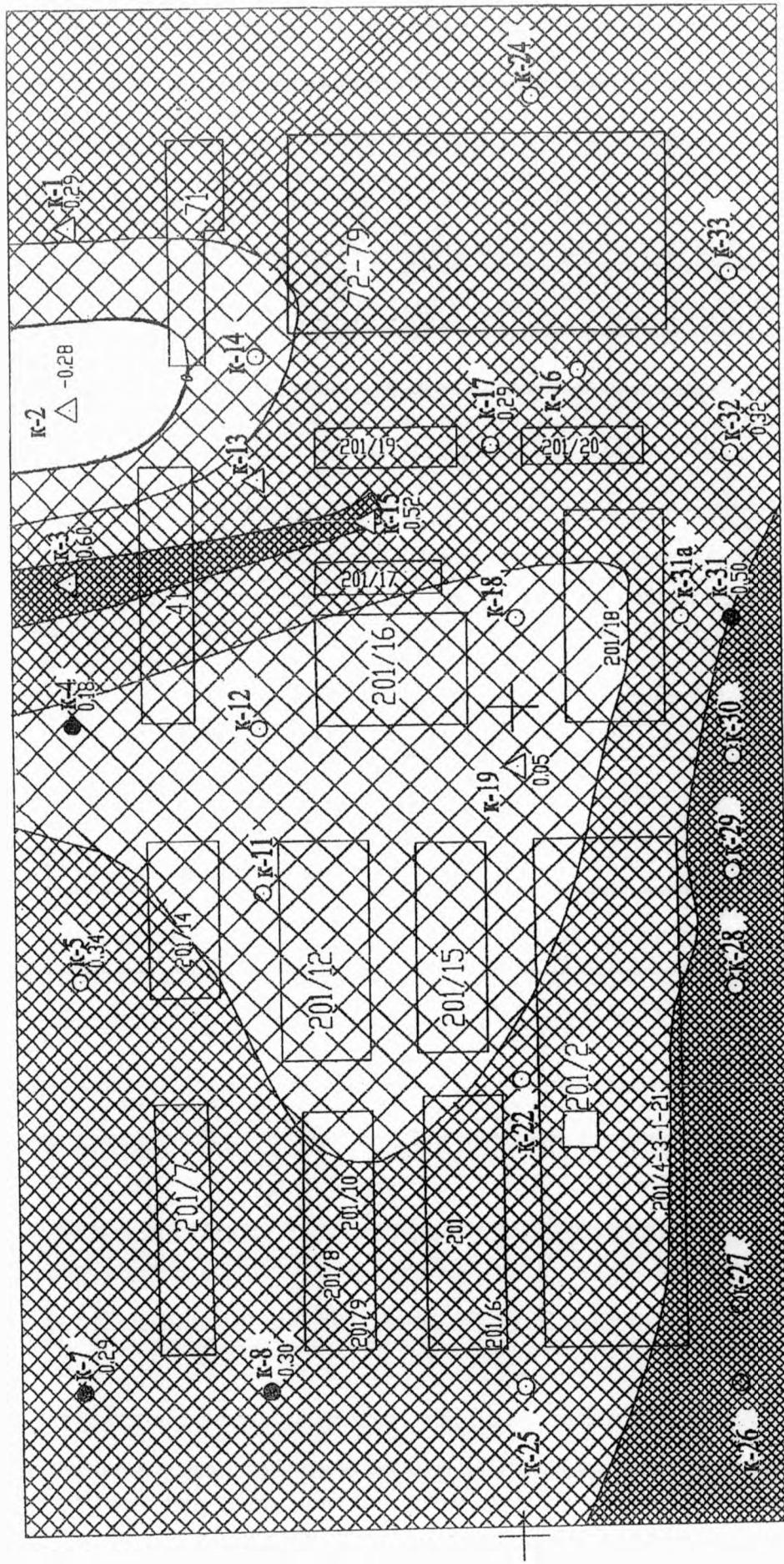


Рис.2.22.Районирование территории АО "Нефтехимик" по показателю  $h_0$  после второго этапа санации

Условные обозначения см. на рис. 2.20

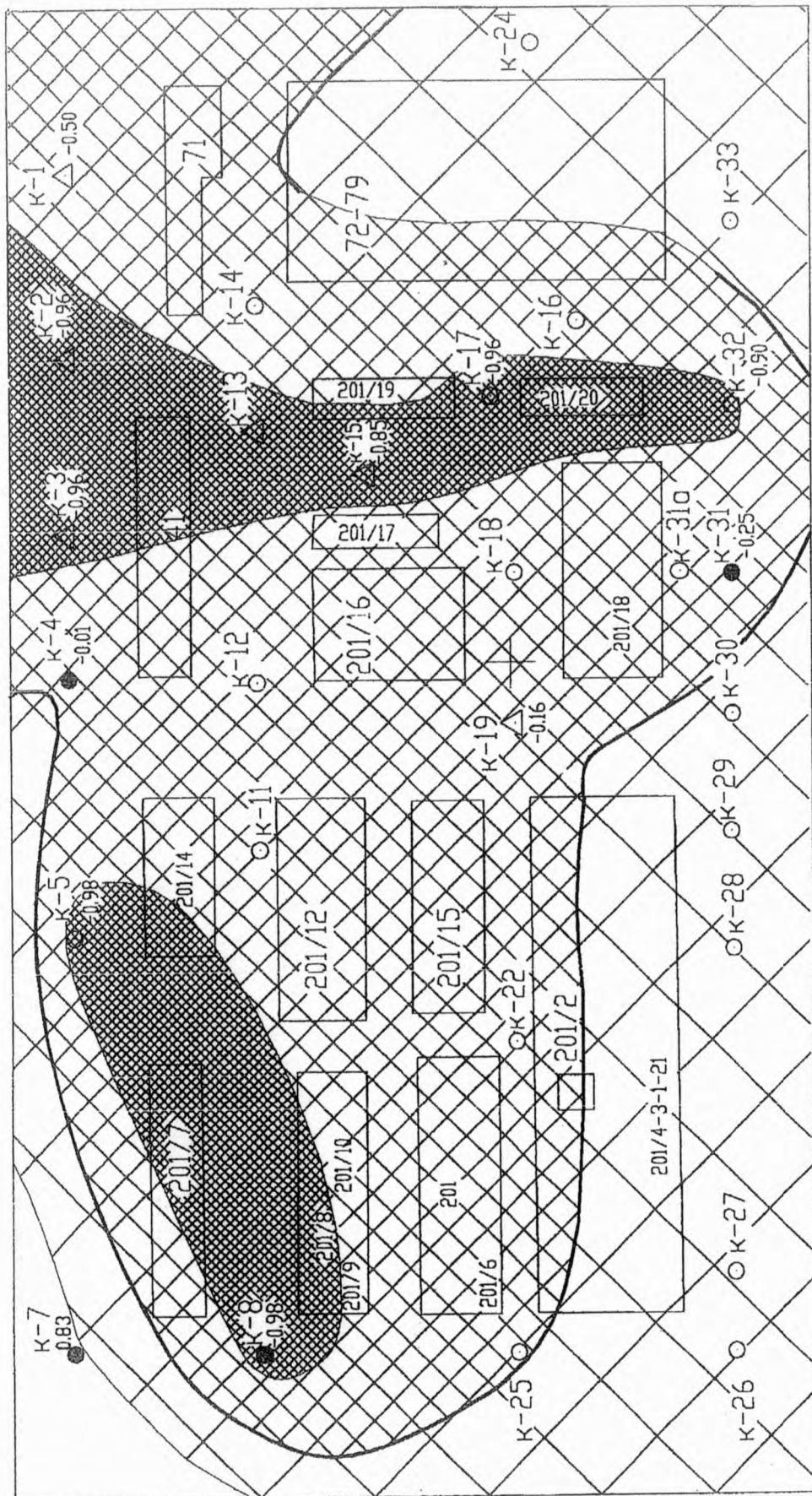


Рис.2.23. Схема районирования территории АО "Нефтехимик" по показателю  $r'$  до санации

Условные обозначения см. на рис. 2.20

- $r' < -0,75$ ;
- $r' > +0,75$ ;
- $r'$  от 0 до -0,75;
- $r'$  от 0 до +0,75;

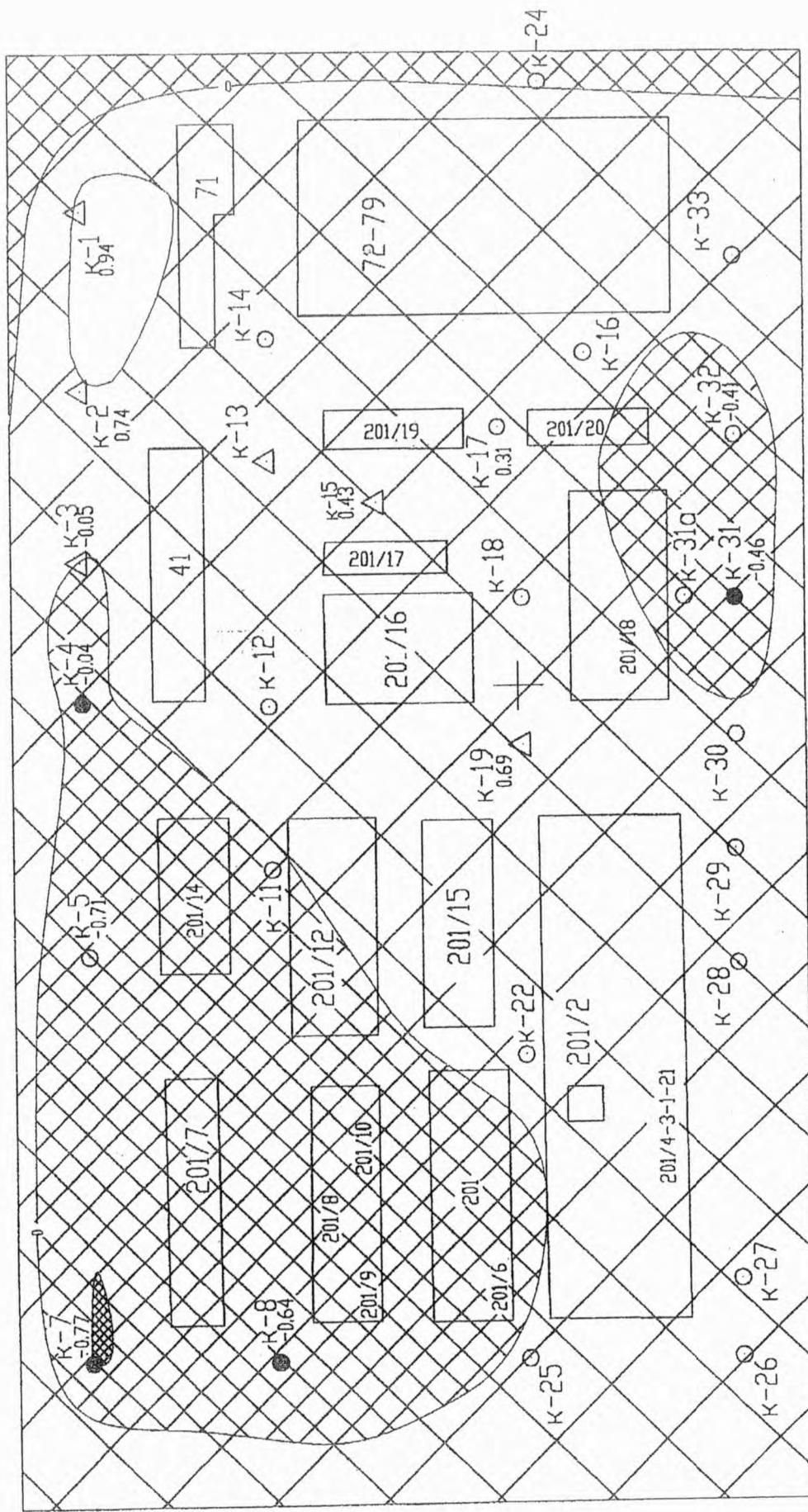


Рис.2.24. Схема районирования территории АО "Нефтехимик" по показателю  $r'$  после первой санации

Таблица 2.24

## Эффективность влияния санации на распределение площадей

Значения показателя	Размер площади, %		
	до санации	1-я санация	2-я санация
Максимальная глубина $h_0$ , м			
< 0			2,0
0 – 0,25	7,00	31,0	23,0
0,25 – 0,5	72,0	63,0	65,0
0,5 – 0,75	15,0	6,0	10,0
> 0,75	6,0		
Коэффициент корреляции $r'$			
0,75 – 1,0	2	1,5	1,1
0 – 0,75	32	67,9	48,3
0 – (-0,75)	51	30,5	49,9
-0,75 – (-1,00)	15	0,1	0,7

Изменения, которые произошли в процессе второй санации по величине  $r'$ , приведены на рис. 2.25.

В целом можно отметить, что закономерное изменение величин  $h_0$  и  $r'$  по площади свидетельствует об эффективности процессов санации и о сложности протекания этих процессов как по разрезу, так и по площади.

Выше было показано, как изменяются концентрация углеводородов, степень очистки, содержание углеводородов по разрезу и глубине, где концентрации углеводородов равны нулю. По этим показателям определена эффективность санации. Для комплексной оценки проводимых работ по очистке грунтов от углеводородов нами проведен дискриминантный анализ по величинам С, СО,  $r$  и  $h_0$  в пределах трех групп. Первая группа – до начала санации, вторая – в процессе первой, третья – второй санации. Для применения ЛДА введено дополнительное условие, заключающееся в том, что значение СО до начала санации равно 1. До проведения расчетов по ЛДА определены корреляционные связи между показателями и классами (табл. 2.25).

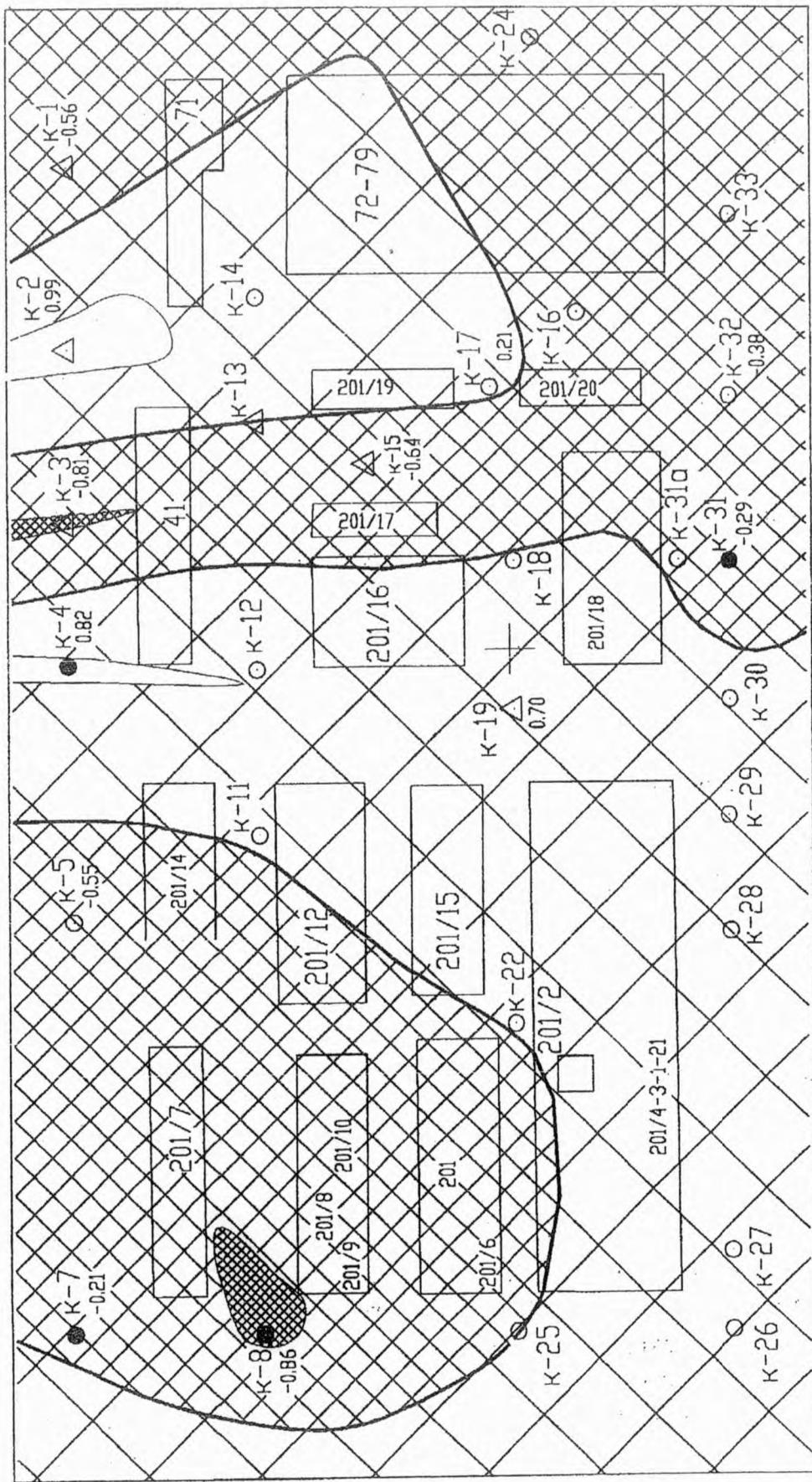


Рис.2.25. Районирование территории АО "Нефтехимик" по показателю  $r'$  после второй санации

Условные обозначения см. на рис. 2.20 и 2.23

Таблица 2.25

## Корреляционная матрица

	C	CO	r	$h_0$	N
Концентрация углеводородов C	1,00	-0,14	-0,22	0,17	0,23
Степень очистки CO		1,00	-0,06	-0,02	0,30
Коэффициент корреляции между С и глубиной r			1,00	-0,81	0,26
Глубина, на которой концентрации УВ равны 0 $h_0$				1,00	-0,35
Этапы санации N					1,00

По корреляционной матрице видно, что вышеупомянутые критерии полностью не описывают происходящие процессы санации, поэтому в качестве комплексной оценки нами предлагается использование ЛДА. В результате расчетов получены следующие линейные дискриминантные функции:

$$R_1 = -0,004851C - 0,055598CO - 0,267388r + 2,998533h_0 - 0,599428, \quad (2.13)$$

$$R_2 = -0,002143C + 0,09434CO - 0,683967r + 0,050252h_0 - 0,407157. \quad (2.14)$$

Используя полученные уравнения, произведен расчет значений  $R_1$  и  $R_2$  как до санации, так и в ее процессе. Результаты расчетов отображены на рис. 2.26 Из рис. 2.26 видно, что до санации значения  $R_1$  и  $R_2$  находятся в правой части графика и между ними существует достаточно тесная корреляционная связь, при этом интервал варьирования значений  $R_1$  больше, чем  $R_2$ . Значения  $R_1$  и  $R_2$  при первой санации располагаются в основном левее, чем до санации, и при этом ослабляется корреляция между ними и несколько увеличивается интервал изменения  $R_2$ . При проведении второй санации происходит смещение значений вправо и вверх, и, самое существенное, что нарушается корреляция между  $R_1$  и  $R_2$ . Таким образом, на данном графике наблюдается динамика санации во времени, о чём свидетельствует группирование точек на поле корреляции по двум группам. Первая – до санации, вторая – после санации. Разделение на группы в пределах этапов санации происходит значительно хуже.

С целью практической реализации для оценки эффективности процесса санации нами выполнен расчет с выделением только двух классов (групп): первый – до санации, второй – в процессе первой санации, а

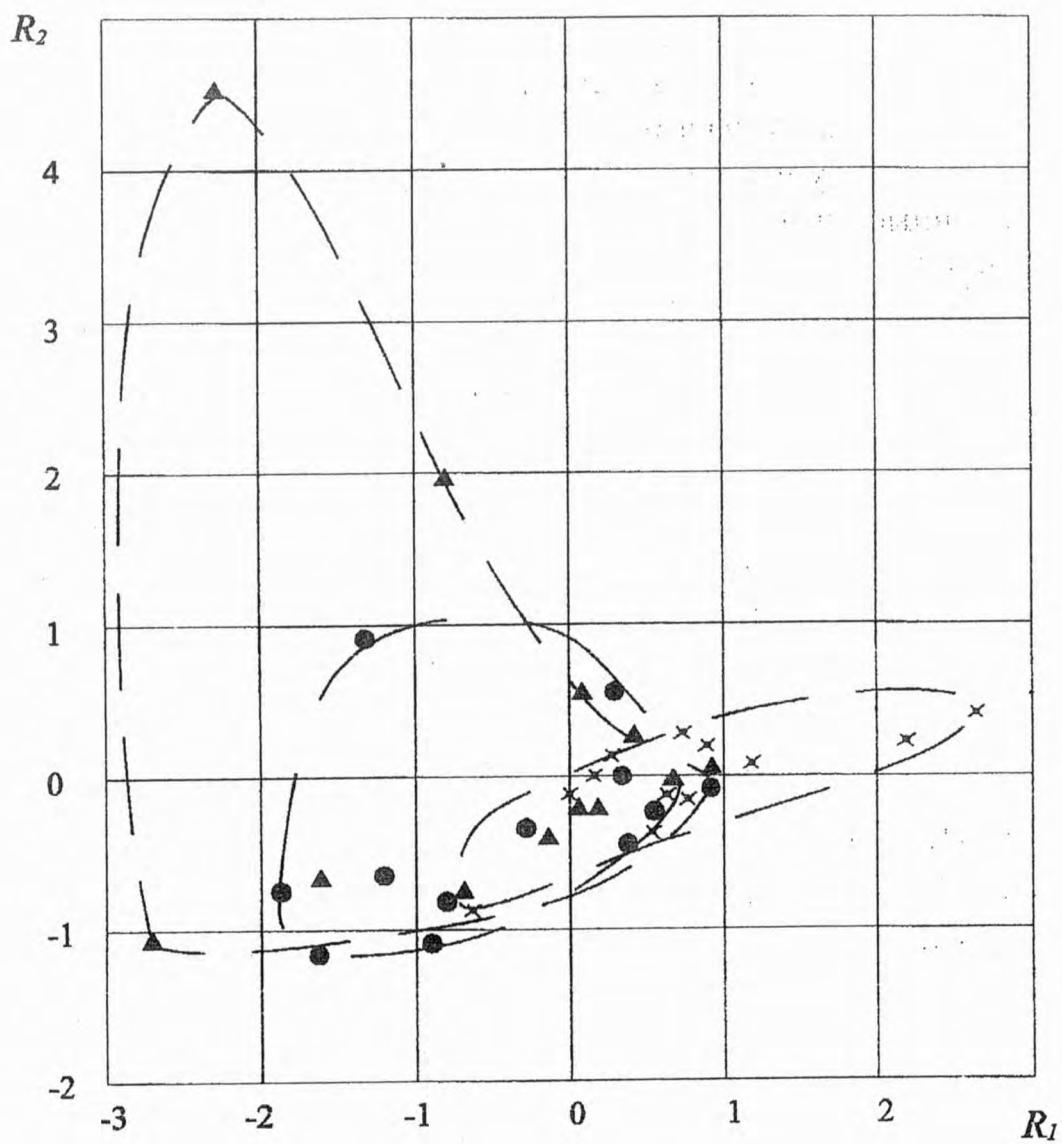


Рис. 2.26. График соотношений  $R_1$  и  $R_2$  в процессе санации

**Условные обозначения:**

$\times$  - до санации;  $\bullet$  - первая санация;  $\blacktriangle$  - вторая санация

данные, полученные в процессе второй санации, использовались как экзаменационные

В результате реализации данной задачи получена следующая ЛДФ:

$$R = 0,00483C + 0,07838CO + 0,44175r - 3,02591h_o + 0,83370, \quad (2.15)$$

при  $R < 0$  – данные до санации, при  $R > 0$  – после санации.

При проверке этой модели по данным, полученным в результате второй санации, выявлено, что 75% всех данных имеют значение больше нуля, 25% – меньше нуля, но значительно больше, чем значение  $R = -0,71$ , являющееся центром группы значений  $R$  до санации. Таким образом, используя численные значения вышеприведенных критериев, полученных как до санации, так и в ее процессе, можно прогнозировать эффективность процесса санации путем отнесения исследуемой точки опробования к тому или иному классу. При этом в качестве данных для расчетов используются данные предыдущего этапа санации.

Выше была дана комплексная оценка эффективности санации независимо от используемых видов. Аналогично схеме, приведенной выше, проанализируем эффективность санации по биологическому и фитологическому видам раздельно. Агротехнический метод не может быть отдельно рассмотрен, так как исследования по нему выполнены в двух скважинах.

По биологическому методу получили следующие дискриминантные функции:

$$R_1 = 0,003693C + 0,068261CO + 1,869893r - 0,080595h_o - 0,162881, \quad (2.16)$$

$$R_2 = -0,008584C - 0,115523CO + 1,707161r + 3,334322h_o + 0,011989. \quad (2.17)$$

Правильность классификации данных до санации составляет 100%, после первой санации – 66,6%, после второй – 50%. Эти данные свидетельствуют о том, что до санации они значительно различались (см. табл. 2.25), затем в процессе санации они сблизились.

Разделение данных на группы по значениям  $R_1$  и  $R_2$  наблюдается до санации, а в процессе проведения санации разделение не проявляется. В связи с этим была определена ЛДФ по двум классам: до санации (класс 1) и в процессе ее (класс 2). Полученная ЛДФ имеет вид

$$R = 0,0016C - 0,0336CO - 2,6329r - 0,3313h_o - 0,11975, \quad (2.18)$$

при  $R_1 = 1,48$  и  $R_2 = -1,48$ . Правильность разделения на группы до санации и после нее составляет 91,66%.

По фитологическому способу

$$R_1 = 0,1088C - 0,6723CO + 2,0304r + 2,2868h_o + 2,1048, \quad (2.19)$$

$$R_2 = -0,008844C - 0,30903CO + 0,62634r - 2,32395h_o + 0,65608. \quad (2.20)$$

Правильность классификации соответственно 75, 50 и 25%.

При использовании только двух классов (до санации и после нее) функция

$$R = 0,1143C + 0,7189CO - 2,1149r - 2,4914h_o + 2,1921, \quad (2.21)$$

при  $R_1 = -1,200993$ ,  $R_2 = 0,60496$ . Правильность разделения на группы до санации и после нее составляет 91,67%.

Для более полного понимания процессов, протекающих при санации, проанализированы данные путем деления их на классы по методам санации (биологический, фитологический и агротехнический) без учета этапности санации. Получены следующие уравнения:

$$R_1 = -0,0096C - 0,0928CO - 0,2482r - 0,9190h_o + 0,9664, \quad (2.22)$$

$$R_2 = -0,0048C - 0,0001CO - 0,6070r + 2,1348h_o - 0,5885. \quad (2.23)$$

По этим уравнениям правильно распознать выделенные классы по видам санации не представляется возможным.

Выполненный анализ показывает, что эффективность проведенных работ по санации на опытном участке АО «Нефтехимик» по комплексному параметру составляет 75%. Вышеприведенную модель можно использовать при оценке эффективности санации на данной территории.

Таким образом, процесс санации описывается математическими моделями, построенными выше. Они позволяют прогнозировать эффективность процесса санации по разным показателям и на разных этапах (как до начала проведения работ, так и в процессе их выполнения). С практической точки зрения путем воздействия на те или иные компоненты системы (с помощью изменения технологии санации) можно управлять самим процессом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные теоретические положения, научные и практические результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

1. Установлено, что распределение углеводородов в массиве грунтов определяется их литологическим составом, пористостью, содержанием в грунтах воды, составом и объемом углеводородов, пролитых на поверхность земли. При этом ведущим показателем, характеризующим это распределение, является литологический состав и тип пористости. Выделяются два типа распределения. Первый тип распределения: с увеличением глубины содержание углеводородов уменьшается. Для данного типа распределения характерны следующие геоэкологические условия: породы, слагающие грунтовый массив, представлены суглинками, глинами, супесями и т.п., то есть пустоты в них представлены порами, и углеводороды в них находятся в дисперсном состоянии. Данный тип распределения обусловлен капиллярным поднятием углеводородов к земной поверхности. Второй тип распределения: с увеличением глубины содержание углеводородов увеличивается. Для данного типа распределения характерны следующие геоэкологические условия: породы, слагающие грунтовый массив представлены плотными трещиноватыми отложениями (песчаники, алевролиты и т.п.), то есть пустотность в них обусловлена трещинами, углеводороды находятся в свободном (жидко-капельном) состоянии. Данный тип распределения обусловлен гравитационными силами, под воздействием которых углеводороды скапливаются в зоне первого водоносного горизонта.

При любом распределении углеводородов определяющим фактором является степень водонасыщения почвогрунтов. При полном водонасыщении нефть не распространяется в грунтовый массив.

2. На основании обработки экспериментальных данных по распределению углеводородов в почвогрунтах разработана математическая модель прогноза загрязнения углеводородами грунтового массива, основанная на общих методах регрессионного анализа. Данная модель является общей, для конкретных условий могут быть изменены угловые коэффициенты и свободный член. Такие конкретные уравнения прогнозирования распределения углеводородов как по первому, так и по второму типу, составлены для условий АО «Нефтехимик» (Пермская область).

С использованием методов дискриминантного анализа построена общая математическая модель, позволяющая при помощи решающих правил с высокой надежностью проводить многофакторное прогнозирование распределения углеводородов по площади. Данная модель опробована на экспериментальном материале, полученном при исследовании нефтезагрязненной территории АО «Нефтехимик».

3. Разработан методологический подход к оценке процесса санации агробиологическими способами. Для оценки эффективности процесса санации выбраны следующие технологические показатели: степень очистки, глубина залегания углеводородов в почвогрунтах и скорость санации. Разработаны математические модели оценки процесса санации по комплексу вышеприведенных показателей. Эти модели являются общими и применимы для территорий, характеризующихся различными геоэкологическими условиями.

Методологический подход к оценке процесса санации с точки зрения его эффективности заключается в том, что на основании данных, полученных на первых этапах санации, используя оценочные модели, можно прогнозировать эффективность последующих этапов санации. При необходимости, если прогнозируемая эффективность процесса санации окажется неудовлетворительной, можно посредством технологических приемов откорректировать этот процесс.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аренс В. Сорбент чистой воды // Нефть. 1996. № 1 (16). – С. 12 - 13.
2. Аронов В.И. Математические методы обработки геологических данных на ЭВМ. М., 1977. 168 с.
3. Букарцев В.П. Вероятностный прогноз нефтеносности // Математика, ЭВМ и АСУ в геологии нефти и газа. М., 1973. С. 7-41.
4. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования в технико-экономических исследованиях. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1981. 236 с.
5. Волков А.М. Структура системы решений геологических задач // Тр. ЗапСибНИГНИ. Тюмень, 1986. Вып. 211. С. 3-8.
6. Вялкова В.И., Большаков А.А. Ликвидация последствий аварийных разливов нефти и мазута. // Изв. вузов. Нефть и газ. 1998. № 6. С. 120-124.
7. Воронин Ю.А. Геология и математика. М., 1967. 251 с.
8. Воронин Ю.А. Теория классификации и ее приложения. Новосибирск, 1985. 270 с.
9. Воронин Ю.А. Распознавание образов в вычислительной геологоразведке // Методы автоматизированной оценки пористости и водонасыщенности в терригенных коллекторах. Тюмень, 1987. С. 12-22.
10. Воронин Ю.А., Еганов Э.А. Методологические вопросы применения математических методов в геологии. Новосибирск, 1974. 75 с.
11. Галкин В.И., Жуков Ю.А., Шишгин М.А. Применение вероятностных моделей для локального прогноза нефтегазоносности. Екатеринбург, 1992. 108 с.
12. Жуков Н.Н. Вероятностно-статистические методы анализа геолого-геофизической информации. Киев, 1975. 304 с.
13. Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии. М., 1969. 396 с.
14. Крамбейн У., Кауфман М., Мак-Кеммон Р. Модели геологических процессов. М., 1973. 149 с.
15. Мазур И. Катастрофу еще можно предотвратить // Нефть России. 1995. № 3. С. 4 - 9.
16. Миллер Р.А., Кан Дж. С. Статистический анализ в геологических науках. М., 1965. 482 с.
17. Островский С. Один в поле не воин // Нефть. 1996. №1 (16). С. 10 - 11.
18. Середин В.В. Исследование пространственного распределения углеводородов в почвогрунтах и водах на территориях, загрязненных нефтью и нефтепродуктами /Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1998. 106 с.
19. Середин В.В. Оценка геоэкологических условий санации территорий, загрязненных нефтью и нефтепродуктами /Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1998. 153 с.

- 20.Харбух Дж. У., Бонем-Картер Г. Моделирование на ЭВМ в геологии. М., 1974. 318 с.
- 21.Шарапов Н.П. Применение математической статистики в геологии. М., 1971. 246 с.

**Научное издание**

**Галкин Владислав Игнатьевич,  
Середин Валерий Викторович,  
Бачурин Борис Александрович**

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ  
МОДЕЛЕЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ  
В ГРУНТАХ И ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ИХ САНАЦИИ**

**Редактор и корректор Н.В. Бабинова**

**Лицензия ЛР № 020370 от 29.01.97**

---

**Подписано к печати 20.05.99. Печать офсетная. Набор компьютерный.**

**Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 8,75 . Тираж 100 экз.**

**Заказ 37**

---

**Редакционно-издательский отдел и ротапринт Пермского  
государственного технического университета  
Адрес: 614600, Пермь, Комсомольский пр., 29а**