

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**Санкт-Петербургский горный университет**

**Кафедра геоэкологии**

# **РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ**

*Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 21.05.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2020**

УДК 504.06 (073)

**РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ:** Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *А.В. Алексеев, Д.О. Нагорнов*. СПб, 2020. 23 с.

Содержат основные сведения об инженерно-экологической характеристике нарушенных и загрязненных земель; оценке миграции и аккумуляции веществ для локализации загрязнения; выборе технологии очистки почв и техногенных отложений.

В процессе освоения дисциплины студент формирует и демонстрирует общепрофессиональные компетенции: способность проектирования процессов очистки почв и техногенных отложений и ограничения наиболее часто используемых технологий ремедиации; умение выполнять подбор одной или нескольких установок для очистки почв до указанных предельных значений и рассчитывать капитальные и операционные затраты на очистку техногенных отложений; владение методами оценки и проверки потенциальных средств ремедиации загрязненных земель в условиях гумидного климата Северо-Запада РФ.

Предназначены для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Горнопромышленная экология».

Научный редактор проф. *Э.А. Кремчев*

Рецензент д-р хим. наук *И.Д. Устинов* (Научно-образовательный центр НПК «Механобр-техника») (АО)

## Введение

*«Античная трагедия в славных русских лицах»*

Дмитрий Файн

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Рекультивация нарушенных земель» посвящены решению проблем, возникающих во всех индустриально развитых регионах мира: **инженерно-экологическая характеристика нарушенных и загрязненных земель; оценка миграции и аккумуляции веществ для локализации загрязнения; выбор технологии очистки почв и техногенных отложений.** Будучи «классическим», стоящий перед обучающимися комплекс задач разработан для условий г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области и учитывает региональные ландшафтные условия, особенности промышленной специализации региона и накопленный экологический ущерб от многолетнего захоронения промышленных и коммунальных отходов. В процессе изучения технологий рекультивации, наиболее часто используемых для очистки загрязненных сред, основное внимание уделяется применимости и ограничениям соответствующих технологий очистки в условиях Северо-Запада РФ.

Методика обучения предполагает лекции и лабораторные или практические занятия по решению поставленных задач. Тематические исследования используются для демонстрации применения технологий ремедиации. Задания выполняются индивидуально. Результаты выполненной работы оформляются в виде отчета, который подлежит защите. Целесообразно придерживаться принятой в настоящих методических указаниях последовательности выполнения заданий.

## 1. Обоснование необходимости рекультивации

Промышленный прогресс оказывает значительное воздействие на окружающую среду, однако, технологическое развитие и изменения в методах управления на протяжении многих лет демонстрируют, что многих негативных последствий можно избежать, проводя работу по восстановлению экосистем после их нарушения (Сорокин, 2016). Законы и постановления государственных, региональных и местных органов власти во всем мире, требующие обеспечения безопасности окружающей среды и возвращения нарушенных земель в приемлемое состояние, отражают возросшее беспокойство в обществе относительно экологических проблем (ГОСТ 17.5.1.02-85; Земельный, 2019).

Рекультивация – комплекс работ, направленных на восстановление продуктивности и экономической ценности нарушенных земель, а также на улучшение условий окружающей среды в соответствии с интересами общества (Герасимова и др., 2003). Долгосрочная рекультивация территорий требует восстановления стабильных циклов питательных веществ для роста растений и микробиологических процессов (Добровольский, 2003), а также проведения ремедиации – очистки химически загрязненных почв и техногенных отложений до нормативных величин концентрации (ГН 2.1.7.2041-06; ГН 2.1.7.2042-06).

Изучаемый в рамках курса объект рекультивации – бывшее муниципальное хранилище жидких отходов в Ленинградской области. До начала их захоронения, территория представляла собой **открытую горную выработку** общей площадью 6,88 км<sup>2</sup>; основным добываемым сырьем являлась фосфатная руда. Активная отработка месторождения происходила с 1960-х по 1980-е гг. В течение этого периода добывалась богатая фосфором руда и производилось ее первичное обогащение.

Образуемые **горнопромышленные отходы включали фосфатную глину (шлам), и крупнозернистые пески**, направляемые на хвостохранилище. Для захоронения глинистого шлама были созданы отстойники с использованием песчаных хвостов для строительства дамб. Эти отстойники были сооружены на отработанных участках карьеров; при отсутствии специальной

гидроизоляции, дном прудов-накопителей оказалась нетронутая глинистая толща. При захоронении глинистого шлама поверх естественного прослоя глин, формировался низкопроницаемый слой природно-техногенных отложений. Пруды-отстойники глинистого шлама были затем законсервированы путем покрытия песчаными хвостами мощностью от 0,9 до 5,5 м.

В 2003 г. муниципальное управление жилищно-коммунальным хозяйством получило разрешение на эксплуатацию части отработанного заброшенного карьера фосфоритного рудника и был сооружен пруд-накопитель площадью 2400 м<sup>2</sup>. В данный пруд направлялись **обводненные осадки коммунальных сточных вод, отходы растительных и животных масел и жиров предприятий общественного питания, отработанные автомобильные масла, промышленные смазочно-охлаждающие масла** и прочие виды жидких отходов.

В 2008 г. рассматривались планы расширения площадки хранилища с целью приема твердых отходов, однако они были отклонены по результатам экологической экспертизы проекта. Тем не менее, в 2009 г. государственные надзорные органы выдали разрешение на строительство второй очереди карт и был сооружен второй, более крупный (6000 м<sup>2</sup>), пруд для утилизации жидких отходов (рис. 1). Второй пруд использовался для накопления осадка коммунальных сточных вод, отделявшегося от других видов отходов.

После выдачи разрешения на эксплуатацию в 2009 г., государственные надзорные органы включили хранилище жидких отходов в реестр опасных производственных объектов. В связи с этим осуществлялся мониторинг участка, который включал сбор и анализ проб поверхностных и подземных вод, а также проб донных отложений из близлежащего поверхностного водотока. Концентрации органических соединений и металлов выше фоновых значений были обнаружены в подземных водах в районе прудов-накопителей. В 2011 г. надзорные органы дополнительно исследовали и оценили объект в ответ на неоднократные письменные обращения местных жителей по поводу оказываемого хранилищем воздействия на окружающую среду и здоровье

человека. В результате, в сентябре 2011 г. государственные надзорные органы **отозвали разрешение на его эксплуатацию**.

В ноябре 2011 г. прием жидких отходов был прекращен. В июне 2012 г. для проведения инженерно-изыскательских работ на площадках были привлечены представители научно-исследовательских центров г. Санкт-Петербурга, участвовавшие в оценке накопленного экологического ущерба совместно с государственными надзорными органами. Было установлено, что из-за очень низкой проницаемости глинистого шлама и повышенного коэффициента увлажнения в условиях Ленинградской области, в бывших отстойниках накопился избыток воды, образовав **подвешенный горизонт верховодки** (рис. 2).



Рис. 1. Внемасштабная план-схема хранилища жидких промышленных и коммунальных отходов в карьере и хвостохранилище фосфоритного рудника

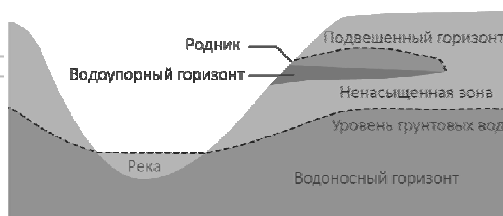


Рис. 2. Формирование подвешенного горизонта верховодки в природных условиях (на основе материалов commons.wikimedia.org)

В результате проведенных инженерно-экологических изысканий было обнаружено загрязнение в приповерхностном подземном водоносном горизонте (табл. 1) и в песчаных хвостах, которыми были обвалованы берега прудов-отстойников.

С 2003 по 2012 гг. в прудах было размещено около **60 тыс. м<sup>3</sup> жидких отходов**. Поскольку пруды не имели гидроизоляции, инфильтрация произошла примерно на 0,3 м через боковые стенки хранилищ и сквозь слой мощностью около 1,5 м по вертикали вниз.

Таблица 1

**Основные сведения о загрязняющих веществах в техногенных отложениях  
(физико-химические характеристики по Kouakou et al., 2013; Nyer, 1992;  
Zhang et al. 2017)**

Вещества	Концентрации	Константа Генри, атм.м <sup>3</sup> /моль	Адсорбция, мг в-ва / г углерода	Возможность биодegradации
Летучие органические соединения				
Бензол	0,1 мг/кг	0,00559	80	2
Тетрахлорметан	0,1 мг/кг	0,0241	6,2	1
Хлороформ	0,08 мг/кг	0,00278	1,6	2
1,1-дихлорэтан	0,025 мг/кг	0,00431	1,2	2
1,2-дихлорэтан	0,02 мг/кг	0,000978	2	2
1,1-дихлорэтен	0,2 мг/кг	0,0340	3,4	2
1,2-дихлорэтен	0,03 мг/кг	0,00656	2,2	2
Дихлорметан	1 мг/кг	0,00203	0,8	2
1,1,1-трихлорэтан	0,05 мг/кг	0,0144	2	2
Трихлорэтилен	0,1 мг/кг	0,0091	18,2	1
Толуол	0,5 мг/кг	0,00637	50	2
Винилхлорид	0,05 мг/кг	0,0891	Следы	1
Экстрагируемые органические соединения				
Пентахлорфенол	0,2 мг/кг	н/д	100	2
Пестициды и полихлорированные дифенилы				
2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота	0,5 мг/кг	н/д	Следы	2
Фенопроп	0,03 мг/кг	н/д	Следы	1
Металлы				
Железо общее	7-45 мг/л	н/д	30-240	1

\* 1 – нерастворяющийся; 2 – способный к разложению

Проведенные изыскания также показали, что загрязненные воды мигрировали за пределы прудов (рис. 3). В сезон дождей уровень воды в подвешенном горизонте повышался выше уровня глинистого шлама и песчаного намыва, из-за чего **загрязненные воды переливались выше дамбы и попадали на прилегающую с севера территорию**, в том числе, в накопитель глинистого шлама.

Подземные водоносные горизонты являются основным источником питьевой воды для населенных пунктов в

непосредственной близости от хранилища жидких отходов. Для предотвращения загрязнения грунтовых вод, Федеральная служба по надзору в сфере природопользования и Правительство Ленинградской области инициировали проектирование мероприятий по ликвидации и рекультивации хранилища жидких отходов.

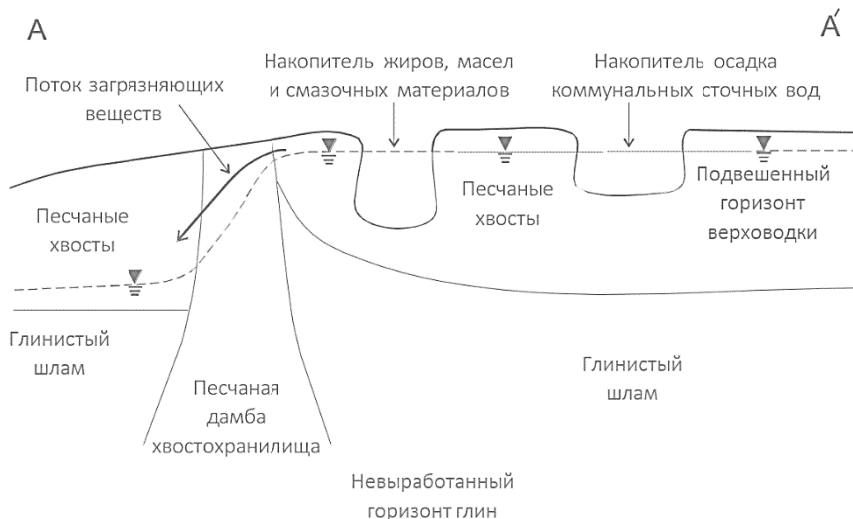


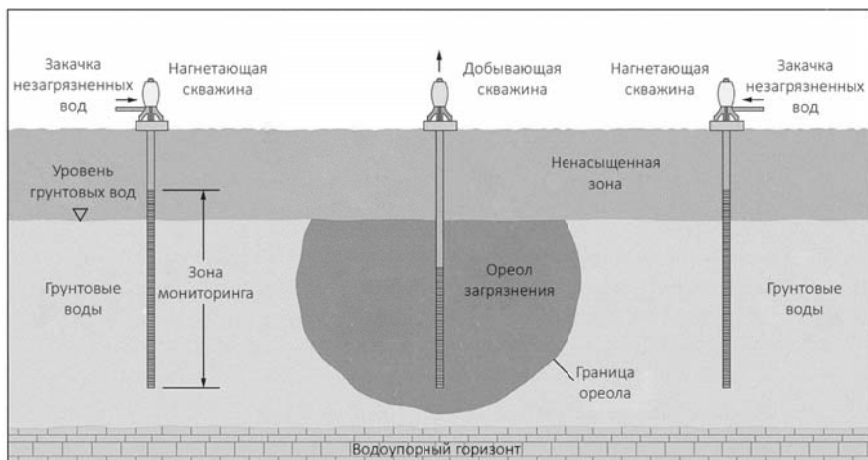
Рис. 3. Внемасштабный литологический разрез территории захоронения жидких отходов по линии А–А’

## 2. Проект рекультивации

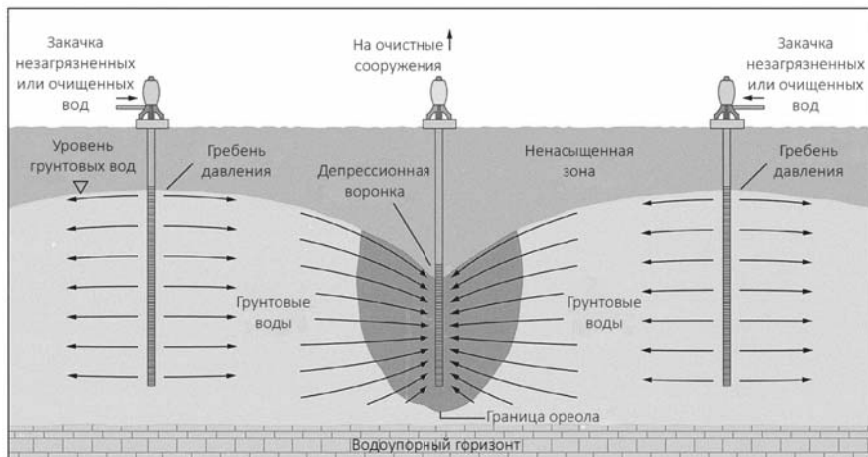
### 2.1. Промывка техногенных отложений *in situ*

Разрабатываемый проект предполагает обезвреживание шлама и иных загрязненных техногенных отложений из контактной зоны с накопителями непосредственно на рекультивируемой территории методом **откачки и очистки загрязненных грунтовых вод**. Данный метод очистки водоносных пластов предполагает применение системы из не менее чем 2 скважин: нагнетающей и добывающей, между которыми находится блок очистки воды. Загрязненная вода из добывающей скважины проходит очистку и закачивается обратно в пласт (рис. 4).





(а) Перед началом работ



(б) Во время проведения работ

Рис. 4. Схема осуществления ремедиации почв и техногенных отложений методом промывки (на основе материалов Brusseau, 2019)

Промывка техногенных отложений – технология очистки, при которой загрязненные почвы и породы заполняются раствором,

который экстрагирует и перемещает загрязняющие вещества на очистные сооружения, где они отделяются и удаляются. Промывка почвы снимает необходимость выемки, обработки или транспортировки опасных веществ. В зависимости от типа загрязняющих веществ в почве (табл. 2) на конкретном участке определяют тип промывочного раствора, необходимого в процессе обработки. Промывочный раствор обычно представляет собой один из двух типов жидкостей: 1) только вода; 2) вода и добавки, такие как кислоты, основания или поверхностно-активные вещества.

Таблица 2

**Экстрагируемые при промывке почв и техногенных отложений соединения и их преобладающие источники**

<b>Вымываемые вещества</b>	<b>Основные источники загрязнения</b>
Тяжелые металлы и металлоиды	Утилизация аккумуляторов, металлизация
Галогенированные растворители (напр., трихлорэтан)	Химчистка, производство электроники
Полихлорированные дифенилы и хлорированный фенол	Пестициды, гербициды, генерация электроэнергии
Ароматические углеводороды (бензол, толуол, крезол, фенол)	Обработка материалов
Бензин и мазут	Переработка нефтепродуктов, транспорт

Вода используется для очистки от легкорастворимых загрязняющих веществ. Кислый раствор представляет собой смесь воды и кислоты, преимущественно, такой как азотная или соляная. Кислотные растворы используются для удаления катионов металлов и органических соединений, которые обычно встречаются после утилизации аккумуляторов или в отходах промышленных процессов хромирования. Например, загрязнение цинком, которое может возникнуть в результате накопления отходов гальванического производства, будет ликвидироваться кислотным раствором. Основной раствор представляет собой смесь воды и, преимущественно, гидроксида натрия и применяется для очистки от фенолов и некоторых анионов металлов. Поверхностно-активные вещества – в основном, эмульгаторы – помогают смешивать с водой маслянистые вещества.

Процесс начинается с бурения **нагнетающих и добывающих скважин** на участке, где было обнаружено загрязнение. Количество, расположение и глубина нагнетающих и добывающих скважин зависят от многих геологических факторов и технических условий. В дополнение к размещению скважин, на площадке должна быть организована система очистки сточных вод.

Существуют также некоторые ограничения использования этой технологии:

- Промывка отложений *in situ* происходит наиболее эффективно на субстрате, имеющем поровые **пространства между частицами**, через которые может проходить раствор. К примеру, если почва глинистая, промывочный раствор не вступает в активный контакт с загрязняющими веществами.

- Некоторые промывочные жидкости содержат добавки, которые могут сами создать **вторичное загрязнение грунтовых вод**, если они не будут полностью удалены.

- **Потоки грунтовых вод** должны быть досконально проанализированы, чтобы спроектировать систему скважин для данного участка. Необходимы обширные полевые исследования для корректного проектирования ремедиации.

- **Состав и расположение горизонтов горных пород** должны быть хорошо известны, чтобы можно было предсказать пути миграции промывочных жидкостей и предупредить возможность распространения загрязнения за пределы области экстракции.

- Поскольку промывка предназначена для удаления конкретных соединений, она **не очень эффективна в почвах, загрязненных смесью веществ**, например, металлов и масел. Достаточно проблематично приготовить промывочный раствор, который бы эффективно удалял несколько различных типов загрязняющих веществ одновременно.

Таким образом, метод ремедиации отложений при помощи их промывки характеризуется следующими особенностями: требуется бурение нагнетающих и добывающих скважин на рекультивируемой территории; экстрагирующий раствор закачивается скважинным методом в почвы или техногенные отложения без их перемещения; наиболее эффективно действует в

субстрате с низким содержанием илстой фракции; чрезвычайно сильно зависит от химического состава ореола загрязняющих веществ.

В случае с рекультивацией рассматриваемого накопителя отходов, предполагаемая **продолжительность работ составляет пять лет**. Этот срок может варьировать в зависимости от типа очистных сооружений, но пятилетний период, установленный в задании, был выбран для упрощения сравнений.

Сброс очищенных до допустимых уровней вод (табл. 3) будет производиться через ирригационную систему на всей рекультивируемой территории, обеспечивая промывку загрязненных отложений. Концентрации загрязняющих веществ в грунтовых водах будут постепенно снижаться по мере производства откачки и очистки. Это снижение нагрузки приводит к необходимости оптимизации функционирования каждого из рассматриваемых типов очистных сооружений.

Таблица 3

**Допустимые содержания загрязняющих веществ при сбросе через ирригационную систему для промывки загрязненных почв и техногенных отложений**

Вещества	Концентрации	Вещества	Концентрации
Бензол	0,005 мг/кг	1,1,1-трихлорэтан	0,2 мг/кг
Тетрахлорметан	0,005 мг/кг	Трихлорэтилен	0,005 мг/кг
Хлороформ	0,0002 мг/кг	Толуол	1 мг/кг
1,1-дихлорэтан	0,81 мг/кг	Винилхлорид	0,002 мг/кг
1,2-дихлорэтан	0,005 мг/кг	Пентахлорфенол	0,001 мг/кг
1,1-дихлорэтен	0,007 мг/кг	2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота	0,07 мг/кг
1,2-дихлорэтен	0,1 мг/кг	Фенопроп	0,5 мг/кг
Дихлорметан	0,005 мг/кг	Железо общее	0,3 мг/л

## **2.2. Гидротехническое обеспечение очистки**

Для контроля уровня подвешенного водоносного горизонта и

предотвращения дальнейшего распространения потоков загрязнения потребовалось строительство изолирующей хранилище отходов стены в грунте (рис. 5) толщиной 0,6 м и глубиной от 6 до 9 м. Бетонирование было произведено с использованием смеси почвы и бентонита – природного глинистого минерала, основным компонентом которого является монтмориллонит. Стена упирается в слабопроницаемый естественный горизонт глин и в первоначальную дамбу, благодаря чему гидравлически изолирует зону пруда-отстойника.

Для организации системы замкнутого цикла очистки водоносного горизонта были пробурены **40 скважин**, 20 в пределах и 20 непосредственно за вновь сооруженной стеной в грунте и старой дамбой. Подземные воды откачиваются с помощью вакуумного насоса, скважины соединены системой трубопроводов, перенаправляющих поток в стальной **вертикальный резервуар для агрессивных химических продуктов емкостью 800 м<sup>3</sup>** (рис. 6), а затем на очистные сооружения.

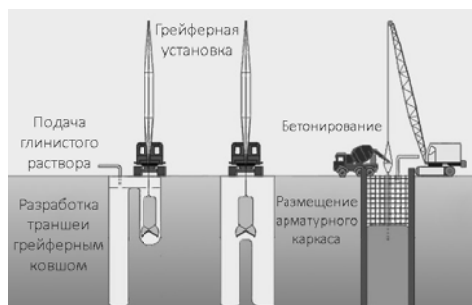


Рис. 5. Схема возведения стены в грунте (источник: beststroy.biz)

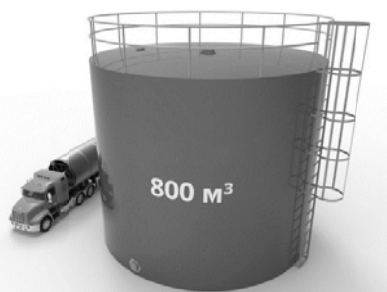


Рис. 6. Резервуар вертикальный с понтоном (источник: barrel-rezervuar.ru)

Общая площадь участка, огороженного стеной в грунте (рис. 7), составляет около **40 тыс. м<sup>2</sup>**. Общая мощность песчаных хвостов составляет **6 м**; из них общая мощность хвостов, насыщенных загрязненными подземными водами, составляет **3 м**. Эффективная пористость, т.е. часть объема, занятая подвижным флюидом, составляет **40 %**.

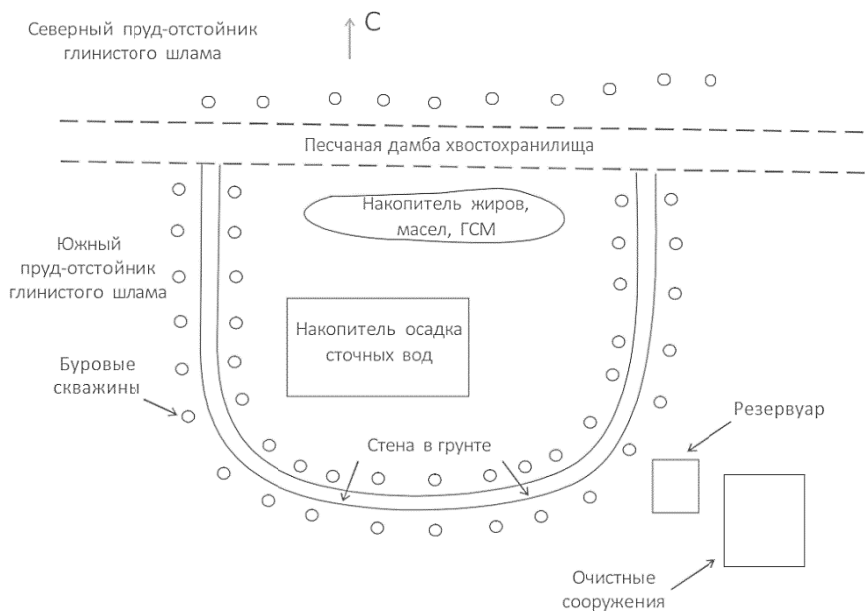


Рис. 7. Внемасштабная план-схема подготовки хранилища жидких отходов к рекультивации

### 3. Подбор методов очистки

#### 3.1. Предварительная обработка

Используя **азрацию**, блок предварительной обработки окисляет грунтовые воды, что приводит к осаждению нерастворимых неорганических твердых веществ, которые могут быть удалены механической фильтрацией вместе с песчаными примесями. Азрацию используют при очистке воды в качестве предварительной обработки **для удаления, в основном, железа и сероводорода** из воды. Кислород является мощным окислителем как железа, так и сероводорода, значительно более эффективным, чем хлор. Он быстро превращает нефилтруемое двухвалентное железо в фильтруемое трехвалентное и переводит сероводород в элементарную серу, которая легко удаляется из воды с помощью фильтра.

На рис. 8 приведена схема небольшого воздушного компрессора и специального резервуара, в котором проводится

обработка. Вышеуказанная система имеет электрически управляемую вентиляционную систему для выпуска сероводородного газа в атмосферу и обеспечения циркуляции воздуха в резервуаре. Воздушный насос подает воздух в резервуар, и в верхней трети резервуара образуется прослой сжатого воздуха. Загрязненная вода поступает в резервуар через приемник слева, попадает в перегородку и распыляется через карман сжатого воздуха. Затем вода аэрируется в резервуаре прежде чем попасть на водовыпуск через трубу справа. Насос и аэратор управляются одной электрической цепью, поэтому, когда насос работает, вентиляция открыта и воздух циркулирует. Когда насос выключается, вентиляционное отверстие закрывается, и карман сжатого воздуха сохраняется. Конструктивные особенности, включая размер и конфигурацию резервуара, время пребывания в нем воды, скорость подачи воздуха, конструкцию фильтра, были оптимизированы для решаемой задачи.

---

*Ограничения метода:* удаляет только металлы, например, железо.

*Эффективность:* 99,7 %.

*Стоимость очистки 100 м<sup>3</sup> загрязненных вод:* 200 руб.

---

### **3.2. Отгонка воздухом**

Отгонка воздухом предполагает переход летучих компонентов из жидкости в воздушный поток. Летучие соединения создают относительно высокое давление пара и имеют низкую растворимость в воде, что зависит от Закона Генри, по которому при постоянной температуре растворимость газа в жидкости прямо пропорциональна давлению этого газа над раствором. Вещества с относительно высокими коэффициентами Генри могут быть экономически эффективно удалены из воды. К ним относятся такие соединения как **бензол, толуол, этилбензол, ксилол и др.**, а также растворители, включая **трихлорэтилен и тетрахлорэтилен**. Аммиак также может быть удален из сточных вод, что часто требует корректировки рН перед удалением. Так как коэффициент Генри увеличивается с температурой, в условиях Ленинградской области наиболее продуктивно очистка будет проходить в летне-осенний

период при положительных среднесуточных температурах воздуха.

Несмотря на то, что любое устройство, способствующее контакту между воздухом и водой, удаляет некоторые летучие соединения, воздухоочистители обычно представляют собой насадочные колонны или колонны с поддонами, работающие с противотоком воды и воздуха. Вода попадает в систему через приемник в верхней части колонны, воздух подается через нижнюю часть (рис. 9).

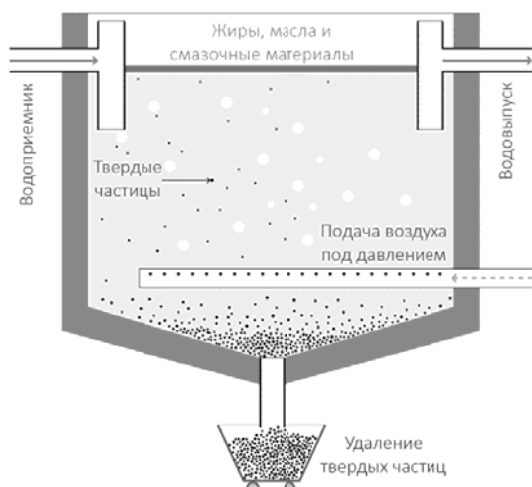


Рис. 8. Схема блока предварительной очистки воды (на основе материалов Tilley, 2014)

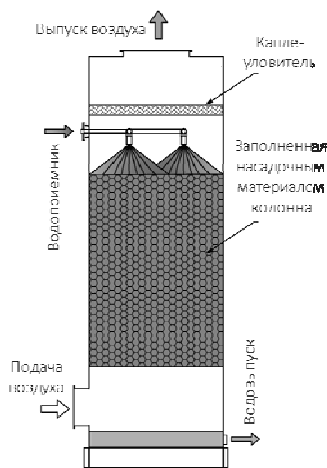


Рис. 9. Схема блока отгонки воздухом (на основе материалов monroenvironmental.com)

Выходящие из системы воды обычно считаются очищенными, но следует провести дополнительное тестирование, чтобы определить, соответствует ли она требованиям к качеству. Поскольку многие из удаляемых газов являются потенциально опасными загрязняющими веществами, также требуется контроль выбросов, выходящих из колонны. Конструктивные особенности, включая размер и конфигурацию колонны, насадочный материал, соотношение воздух-вода, были оптимизированы для решаемой задачи по рекультивации накопителя отходов.



---

*Ограничения метода:* удаляет только вещества со значением коэффициента (константы) Генри выше 0,003 атм.м<sup>3</sup>/моль.

*Эффективность:* 98 %, эффективность ниже для соединений с низкими значениями коэффициента Генри.

*Стоимость очистки 100 м<sup>3</sup> загрязненных вод:* 800 руб.

---

### **3.3. Отгонка паром**

Отгонка паром применяется для удаления из сточных вод таких соединений как **углеводороды** и различные **летучие органические соединения** (ЛОС). Метод основан на пропускании потока перегретого пара через воды, при котором удаляются ЛОС. Выпаривание органического вещества в значительной степени определяется температурой. Из-за более высокой температуры, по сравнению с отгонкой воздухом, эффективность очистки оказывается значительно более высокой. Дополнительная обработка воздуха не требуется; удаленные компоненты находятся в концентрированном потоке, который можно либо рекуперировать, либо сжигать.

Принцип основан на снижении парциального давления загрязняющего вещества путем нагревания и создания массопереноса из воды в газовую фазу посредством подачи пара. Отпарная колонна состоит из подающего насоса с теплообменником, насадочной колонны, конденсатора с разделительным барабаном и приемным фильтром-отстойником. В очищаемых водах не должно быть твердых примесей, которые могут заблокировать теплообменник. Данный метод эффективен, когда летучие органические соединения слаборастворимы или имеют точки кипения ниже, чем у воды.

---

*Ограничения метода:* удаляет только органические соединения со значением коэффициента (константы) Генри выше 0,0004 атм.м<sup>3</sup>/моль.

---

---

*Эффективность:* 99 %, эффективность ниже для соединений с низкими значениями коэффициента Генри.

*Стоимость очистки 100 м<sup>3</sup> загрязненных вод:* 16 000 руб.

---

### **3.4. Адсорбция активированным углем**

Адсорбция – физический и химический процесс накопления вещества на границе раздела между жидкой и твердой фазами. Активированный уголь используется для адсорбции **природных органических соединений, синтетических органических химикатов** и удаления привкуса и запаха, а в некоторых случаях он может быть эффективен против микроорганизмов (рис. 10). Однако, как правило, этот способ очистки не снижает содержание растворенных твердых веществ или тяжелых металлов. Лишь несколько систем угольных фильтров сертифицированы для удаления свинца, асбеста и кишечной палочки.

Активированный уголь производится из различных углеродных материалов в высокотемпературном процессе, который создает матрицу из миллионов микроскопических пор и щелей. Удельная поверхность 1 г активированного угля может составлять от 500 до 2200 м<sup>2</sup>. Поры улавливают микроскопические частицы и крупные органические молекулы, в то время как активированная поверхность адсорбирует малые органические молекулы.

Способность фильтра с активированным углем удалять определенные микроорганизмы и некоторые органические химические вещества, особенно пестициды, трихлорэтилен и полихлорированные дифенилы, зависит от таких факторов как тип углерода, конструкция фильтра и скорость потока воды, продолжительность эксплуатации фильтра, типы загрязняющих веществ, которые удалялись фильтром ранее. Процесс адсорбции также контролируется диаметром пор в угольном фильтре, т.е., в целом, скорость адсорбции является функцией молекулярной массы и размера молекулы органики.

---

*Ограничения метода:* удаляет только органические соединения с концентрацией ниже 1 %, жиры и масла с концентрацией ниже 10 мг/кг.

---

---

*Эффективность:* степень удаления составляет 90 % при поглощающей способности до 50 мг вещества / г углерода.  
*Стоимость очистки 100 м<sup>3</sup> загрязненных вод:* 1000–5000 руб.

---

### 3.5. Биологическая очистка

Погружные дисковые вращающиеся биологические фильтры – аппараты в виде барабана диаметром до 6 м, полупогруженные в мелкий бассейн для аэробной очистки сточных вод (рис. 11). Процесс включает в себя обеспечение контакта вод с биологической средой для удаления **растворенных органических загрязняющих веществ**.

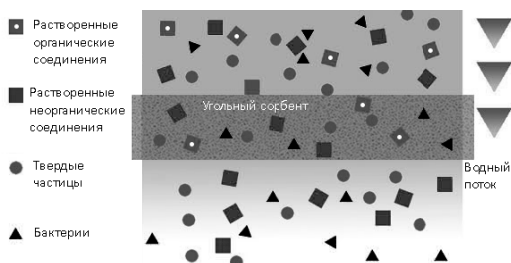


Рис. 10. Процесс сорбции активированным углем (на основе материалов freedrinkingwater.com)

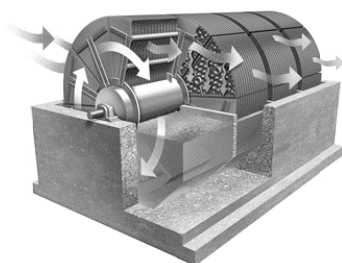


Рис. 11. Погружной дисковый вращающийся биологический фильтр (источник: walker-process.com)

Фильтр состоит из ряда близко расположенных параллельных дисков, установленных на вращающемся валу, который поддерживается непосредственно над поверхностью воды. Диски состоят из пластиковых листов диаметром от 2 до 4 м и толщиной до 10 мм. Несколько модулей могут быть расположены параллельно или последовательно в зависимости от объема очищаемой воды. Диски погружены в сточные воды примерно до 40 % их диаметра. Приблизительно 95 % площади поверхности, таким образом, поочередно погружается в сточные воды и затем аэрируется. Микроорганизмы культивируются на поверхности дисков, где происходит биологическое разложение соединений в водах.

---

*Ограничения метода:* удаляет только биоразлагаемые соединения с концентрацией ниже токсического уровня для микроорганизмов при биохимическом потреблении кислорода до 50 мг/л.

*Эффективность:* степень удаления биоразлагаемых соединений составляет 90 %, прочих веществ – не более 30 %.

*Стоимость очистки 100 м<sup>3</sup> загрязненных вод:* 600 руб. при первом запуске и 800 руб. на последующих этапах из-за дополнительных затрат на питательные вещества.

---

**Составление последовательной программы очистки техногенных отложений** проводится на основе приведенных данных о загрязняющих химических веществах, технических условиях очистки вод при четырех различных вариантах обработки и удельных затратах на капитальное строительство (табл. 4), эксплуатацию и техническое обслуживание.

*Таблица 4*

**Стоимость приобретения, установки и запуска очистного оборудования для ремедиации загрязненных отложений методом промывки**

<b>Блоки очистки</b>	<b>Капитальные затраты</b>
Предварительная обработка	15 млн руб.
Отгонка воздухом	38 млн руб.
Отгонка паром	56 млн руб.
Адсорбция активированным углем	38 млн руб.
Дисковая биофильтрация	45 млн руб.

#### **4. Задание**

1. Зная насыщенный объем и эффективную пористость, рассчитайте **объем откачиваемых подземных вод** (в м<sup>3</sup>), которые потребуют очистки.

2. Зная время, требуемое для заполнения вертикального резервуара емкостью 800 м<sup>3</sup> при средней производительности добывающей скважины в 55 м<sup>3</sup>/ч, **выберите одну или несколько установок для очистки** до указанных предельных значений (табл. 3). Работая в парах, подготовьте краткие сообщения с презентацией на не менее чем 15 мин. об иностранном опыте применения одного из методов очистки: pretreatment

(предварительная обработка), air stripping (отгонка воздухом), steam stripping (отгонка паром), carbon adsorption (адсорбция активированным углем), rotation biological contactor (дисковая биофильтрация).

3. Рассчитайте среднегодовую стоимость очистки техногенных отложений: **капитальные и операционные затраты на 5 лет** при средней производительности очистных сооружений  $800 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

### **5. Технические допущения**

1. Блоки очистки были выбраны для удовлетворения соответствующих требований по промывке почв и техногенных отложений. Такие конструктивные особенности блоков как размеры, время пребывания сточных вод в очистной установке, скорость перелива и другие параметры установлены заранее.

2. Величины затрат приводятся с использованием средних значений, и для упрощения моделирования приведены только общие статьи расходов. Фактическое сравнение затрат является намного более сложным и не входит в рамки данного курса.

3. Приведенные значения эффективности удаления загрязняющих веществ рассчитаны исходя из средних показателей и могут варьировать в зависимости от конкретного типа жидких отходов.

4. Выбор оптимальных очистных сооружений представляет гораздо более сложную задачу, решение которой невозможно детально смоделировать в рамках временных ограничений данного курса. Тем не менее, были предприняты все усилия для учета наиболее важных аспектов обращения с жидкими отходами. Проектирование самих очистных сооружений не входит в рамки данного курса.

## РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### *Основной*

1. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы (генезис, география, рекультивация). Под ред. Г.В. Добровольского. – М.: Ойкумена, 2003, 266 с.
2. Добровольский В.В. Основы биогеохими. – М.: Издательский центр «Академия», 2003, 400 с.
3. Сорокин Н.Д. Рекультивация нарушенных и загрязненных земель. – СПб: Знание, 2016, 404 с.

### *Дополнительный*

4. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве.
5. ГН 2.1.7.2042-06. Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве.
6. ГОСТ 17.5.1.02-85. Охрана природы. Земли. Классификация нарушенных земель для рекультивации. – М., 1986 – 8 с.
7. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001. N 136-ФЗ (ред. от 27.12.2019)
8. Brusseau M.L. Soil and Groundwater Remediation // Environmental and Pollution Science, 2019, pp. 329-354.
9. Kouakou U., Ello A.S., Yapo J.A., Trokourey A. Adsorption of iron and zinc on commercial activated carbon // Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, 2013, 5(6), pp. 168-171.
10. Nyer E.K. Practical techniques for groundwater and soil remediation. Kluwer Lewis Publishers/CRC Press, Boca Raton, 1992, 224 p.
11. Tilley E., Ulrich L., Luethi C., Reymond P., Zurbruegg C. Compendium of Sanitation Systems and Technologies. 2nd Revised Edition. Duebendorf: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2014, 176 p.
12. Zhang X., Hao Y., Wang X., Chen Z. Adsorption of iron(III), cobalt(II), and nickel(II) on activated carbon derived from *Xanthoceras Sorbifolia Bunge* hull: mechanisms, kinetics and influencing parameters // Water Science and Technology, 2017, 75(7-8), pp. 1849-1861.

## Содержание

Введение.....	3
1. Обоснование необходимости рекультивации.....	4
2. Проект рекультивации .....	8
3. Подбор методов очистки .....	14
4. Задание .....	20
5. Технические допущения.....	21
Рекомендуемый библиографический список.....	22

## **РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ**

*Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 21.05.04*

Сост.: *А.В. Алексеенко, Д.О. Нагорнов*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
геоэкологии

Ответственный за выпуск *А.В. Алексеенко*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 29.06.2020. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 1,3. Усл.кр.-отт. 1,3. Уч.-изд.л. 1,1. Тираж 75 экз. Заказ 414. С 34.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2