

Б.А. Лысиков, Л.Л. Кауфман

ПОДЗЕМНЫЕ СТРУКТУРЫ

(обзор зарубежного опыта)

Часть 1

Издательство
НОРД-ПРЕСС
Донецк 2005

УДК 622.035.4

ББК 33.1

Л-88

Лысиков Б.А., Кауфман Л.Л.

Подземные структуры. (в 2^х частях): часть 1. Монография.

/ Лысиков Б.А., Кауфман Л.Л. – Донецк: «Норд-Пресс»,

2005. – 280 с.

Lisikov B.A., Kaufman L.L.

Underground structures. (2 volumes): Volume 1. Monographie.

/ Lisikov B.A., Kaufman L.L. –Donetsk, «Nord-Press»,

2005. – 280 p.

Книга является обзором зарубежного строительства подземных сооружений и использования естественных подземных структур. Предложена классификация подземных объектов и приведены характерные примеры.

В 1-ую часть включены способы подземного хранения энергетических ресурсов, складирование радиоактивных отходов и научные лаборатории, расположенные под землей. Во 2-ую часть вошли описания гражданских и военных объектов, а также подземного складирования природоохранного назначения – промышленных отходов и парниковых газов.

Авторы надеются, что книга будет полезна специалистам, студентам, другим читателям, интересующимся использованием подземного пространства.

Рецензенты:

Шашенко А.Н. – докт.техн.наук, профессор, зав.каф. «Строительные геотехнологии и геомеханика» Национального горного университета, г. Днепропетровск

Дружко Е.Б. – докт.техн.наук, профессор каф. «Основания, фундаменты и подземные сооружения» Донецкой государственной академии строительства и архитектуры (ДонГАСА)

Рекомендовано к печати Ученым советом Донецкого национального технического университета (протокол №5 от 17.06.2005 г.)

ISBN 966...

Б.А. Лысиков, Л.Л. Кауфман
«Норд-Пресс», 2005

This book reviews the underground construction and utilization of natural underground structures. The authors have offered a classification of system of underground formations, explained and described examples of them.

Through out the volume 1 are descriptions and illustrations of underground storages of energy resources, nuclear waste, and scientific laboratories that deal in these fields. Following this, in 2 volume are through explanation and illustrations of civil and military structures, storage of industrial waste and greenhouse gases.

This book will be useful for experts, students and general readers who are interested in the utilization of underground space.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Введение	6
Глава 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	9
1.1 Классификация подземных структур	9
1.2 Достоинства и недостатки подземного расположения структур	12
1.3 Некоторые сведения о выборе строите- льных решений	17
Глава 2 ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ ЭНЕРГЕ- ТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ	27
2.1 Хранилища природного газа и нефтеп- родуктов	27
2.2 Стратегический нефтяной резерв США.....	44
2.3 Подземные угольные склады	46
2.4 Гидроаккумулирующие электростанции	48
2.5 Пневмоаккумулирующие электростан- ции.....	61
2.6 Термальная энергия.....	66
Глава 3 СКЛАДИРОВАНИЕ РАДИОАКТИВ- НЫХ ОТХОДОВ	69
3.1 Хранение радиоактивных отходов в США	69
3.2 Хранение радиоактивных отходов в странах мира	82
Глава 4 НАУЧНЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ СТРУКТУ- РЫ	93
4.1 Физические лаборатории США	93
4.2 Физические лаборатории стран мира	111
Библиография	141

CONTENTS

	Page
Introduction	6
Chapter 1 OVERVIEW	9
1.1 Classification of Underground Structures.....	9
1.2 Advantages and Disadvantages of Under- ground Structures	12
1.3 Some Details of Design of Underground Structures	17
Chapter 2 UNDERGROUND STORING OF EN- ENERGY RESOURCES	27
2.1 Storing of Natural Gas and Petroleum Products.....	27
2.2 Strategic Petroleum Reserve	44
2.3 Underground Coal Stocks	46
2.4 Pumped Hydro-Electric Power Plants	48
2.5 Compressed Air Energy Power Plants	61
2.6 Thermal Energy Storage Systems	66
Chapter 3 NUCLEAR WASTE UNDERGROUND DISPOSAL	69
3.1 Nuclear Waste Storing in USA	69
3.2 Nuclear Waste Storing in the World	82
Chapter 4 UNDERGROUND SCIENTIFIC STRUCTURES	93
4.1 Physical Laboratories in USA.....	93
4.2 Physical Laboratories in the World.....	111
Bibliography	141

Введение

Слово «структура» означает: устройство, строение, состав, конструкция. Темой книги является описание подземных структур, естественных или искусственных, используемых человеком.

В течение сотен тысяч лет зона обитания человека ограничивалась пространством в двух измерениях – поверхностью земли. С течением времени понуждаемые необходимостью, любопытством и страхом люди начали освоение третьего измерения – подземного пространства. Вначале использовались естественные подземные полости – пещеры и гроты, затем в целях добычи полезных ископаемых или для защиты себя и своих семей люди стали создавать подземные объекты целенаправленно и активно.

В наши дни бурного развития технологии и строительства интенсивное освоение подземного пространства вызывается следующими основными причинами:

- недостатком свободных территорий для строительства на поверхности, особенно в больших городах с плотной городской застройкой;

- необходимостью изоляции подземных сооружений от условий поверхности: климатических (экстремально высокие или низкие температуры, ураганы, торнадо и другие природные катаклизмы), шума и вибраций, социальных нагрузок в районе строительства (численность населения, перегрузка транспортных коммуникаций, насыщенная сеть инфраструктуры);

- вредным влиянием проектируемых объектов на окружающую среду (складирование радиоактивных отходов, изоляция парниковых газов).

В книге сделана попытка систематизировать подземные структуры, а также описать возможности и способы их использования. Особое внимание уделено сооружениям, специально созданным для различных отраслей науки и техни-

ки, а также тем трудностям, с которыми сталкиваются при этом проектировщики и строители.

Книга, разумеется, не претендует на всеобъемлющий обзор имеющегося огромного количества подземных структур. Задачей авторов было показать возможность подземного строительства для самого широкого и разнообразного состава промышленных и социальных объектов, поэтому далее рассмотрены только наиболее характерные и интересные примеры их размещения под землей.

В основу построения книги положена предлагаемая авторами классификация подземных структур (рис. 1.1) за некоторыми исключениями:

- рассмотрение предприятий, имеющих целью добычу полезных ископаемых – шахт, угольных или рудных, нефтяных или газовых промыслов и т.д. – выходит за рамки данной книги;

- объекты инфраструктуры, располагаемые в подземном пространстве, описаны в книге авторов «Подземная инфраструктура городов», Донецк, Норд-Пресс, 2004 г. и поэтому в состав данной книги не входят. Исключение сделано лишь для раздела «Термальная энергия», где для полноты обзора хранения энергетических ресурсов даны краткие сведения о системах инфраструктуры теплоснабжения;

- обзор подземных хранилищ, связанных с природоохранными мероприятиями, перенесен во вторую часть книги.

Конфигурация, размеры, взаимное расположение подземных объектов определяются, в первую очередь, технологическими процессами, для которых они предназначены. Тем не менее, авторы старались ограничиться только горностроительными вопросами и избегать подробного рассмотрения теоретических и технологических вопросов, связанных с назначением и эксплуатацией оборудования. В связи со спецификой гидро- и горно-геологических характеристик условий строительства, в книге лишь упомянута необходи-

мость их тщательного изучения, хотя эти условия определяют не только технические решения, но, зачастую, и собственно возможность строительства. Подобным же образом весьма сложные вопросы механики горных пород и условий поддержания полостей, камер и протяженных выработок затронуты конспективно, попутно с основным описанием рассматриваемых комплексов.

Во вторую часть книги войдет описание подземных хранилищ природоохранного назначения, гражданских и военных объектов, а также естественных подземных структур.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Классификация подземных структур

Подземные структуры могут быть классифицированы по различным признакам. Эти структуры могут быть естественными или искусственными сооружениями. Естественные – такие, как пещеры, – созданы в ходе эволюции Земли и являются результатом ее тектонической деятельности или эрозионного воздействия воды и ветра. К используемым человеком естественным структурам, кроме пещер, можно также отнести месторождения полезных ископаемых, а также пористые слои горных пород, в которые закачиваются для хранения природный или углекислый газы.

Искусственные структуры, являющиеся результатом деятельности человека, могут быть, в свою очередь, разделены на созданные целенаправленно, т.е. специально для размещения нужных объектов, и оставшиеся после использования по основному назначению – например, закрытые угольные, рудные, соляные шахты или полости, оставленные после добычи строительных материалов – известняка, песчаника и др.

Важным классификационным признаком является назначение подземного объекта (рис. 1.1).

Подземные сооружения могут быть классифицированы также по другим признакам – геометрии (форма, размеры, глубина от поверхности земли и др.), природным условиям места расположения (география, климат, гидрогеология).

Так, по глубине расположения подземные сооружения могут быть классифицированы следующим образом:

Глубина	Местные коммуникации, м	Здания, м	Магистральные коммуникации городского транспорта, м	Шахты, м
Малая	0...2	0...10	0...10	0...100
Средняя	2...4	10...30	10...50	100...1000
Большая	более 4	более 30	более 50	более 1000

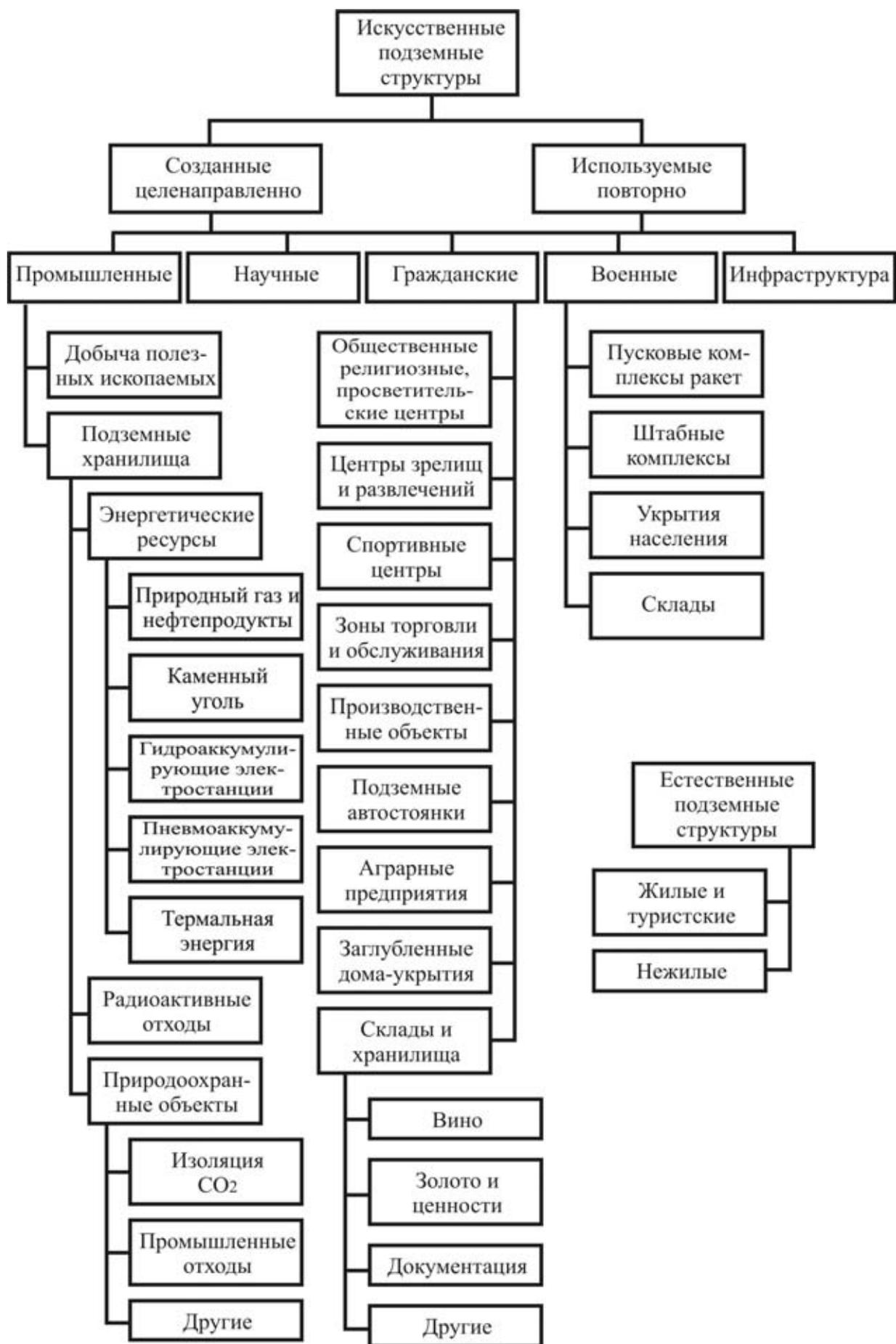


Рис. 1.1. Классификация подземных структур по назначению

Подземные объекты можно классифицировать по отношению к поверхности: они могут быть обвалованы или погружены под поверхность полностью или частично. Пол обвалованной структуры находится на уровне земли или несколько ниже его, а вокруг строения насыпается грунт. Расположенный на уровне поверхности вход и сбалансированное соотношение вынутаго и насыпанного грунта являются преимуществами такого строительства.

Полностью погруженные структуры расположены под существующим уровнем поверхности земли. Их отличия от обвалованных строений очевидны. Менее очевидны их отличия от частично погруженных объектов, например, нагорных, т.е. находящихся на склоне холма, погруженных в землю с одной стороны и открытых с других.

Частично погруженные объекты могут быть подразделены на те, в которых и стены и крыша окружены землей и те, в которых слоем грунта покрыта только крыша.

Подземные объекты могут классифицироваться по способу доступа к ним, т.е. по наличию вертикальных или горизонтальных входов (рис. 1.2). такие решения часто комбинируются. Строительство этих объектов может выполняться подземным или открытым способами.

Подземный способ осуществляется в определенных (ограниченных) пунктах с поверхности через вертикальные шахты или горизонтальные туннели. Открытый способ предполагает выемку грунта экскаваторами с поверхности, сооружение объекта, а затем его покрытие строительными конструкциями и грунтом.

Подземные объекты могут подразделяться на располагаемые в обычных горных породах, где они сооружаются комбайновой проходкой или буровзрывными работами, либо в соляных месторождениях, где образование необходимых полостей осуществляется растворением соли по специальной технологии.

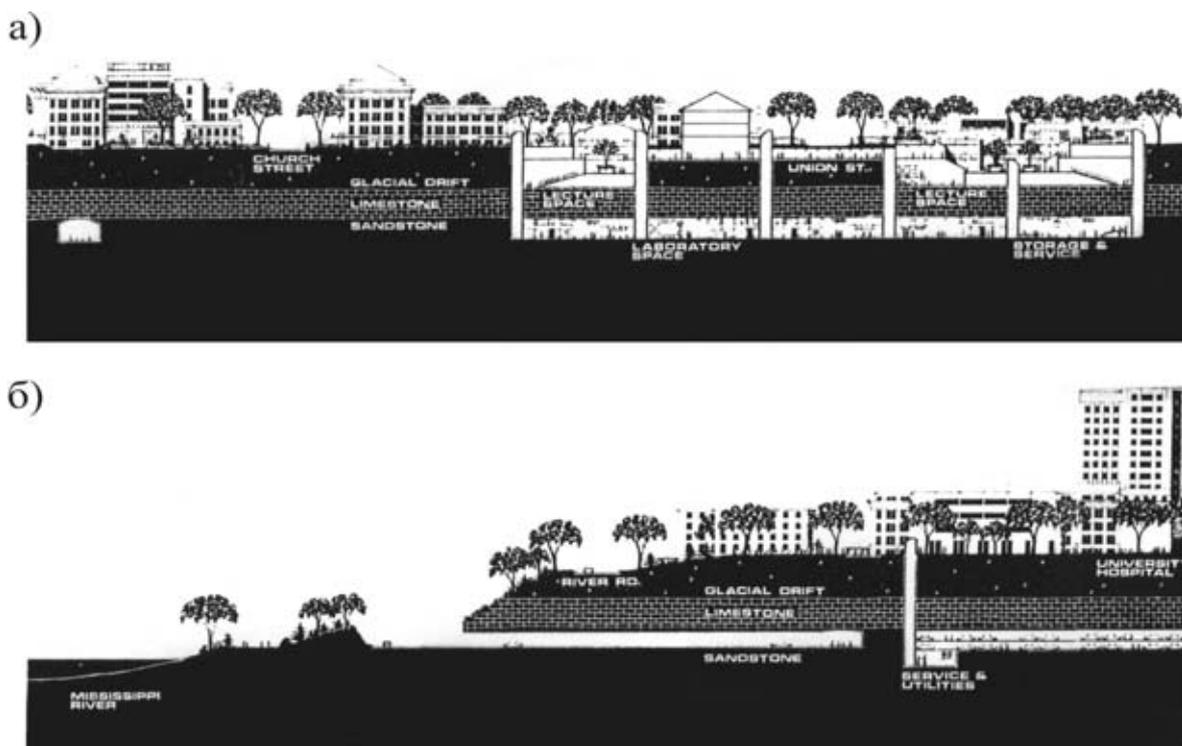


Рис. 1.2. Классификация подземных структур по способу доступа к ним

а – вертикальные входы (шахты); б – горизонтальные входы (туннели)

1.2 Достоинства и недостатки подземного расположения структур

Принимая решение, располагать ли объект на поверхности или под землей, следует учитывать достоинства и недостатки подземного строительства.

Полностью или частично подземные сооружения менее заметны, чем обычные, что позволяет сохранить характер ландшафта, где вторжение построенных человеком объектов является нежелательным. Многие строения в национальных парках построены по этому принципу. Подобным же образом избегают строительства наземных современных зданий в исторических или густонаселенных районах, где дополнительные сооружения увеличивают плотность застройки. Строительство подземных или заглубленных зданий сохраняет открытые пространства на поверхности для

использования в других целях. Так, комплекс библиотеки в Миннеаполисе, штат Миннесота был построен на меньшем участке, чем требовалось бы при строительстве на поверхности. Это было достигнуто подземным расположением библиотеки и строительством стоянки автомобилей на ее крыше. В других случаях на крышах подземных школ располагаются школьные игровые площадки.

Подземное расположение объектов, особенно промышленных, имеет преимущество, когда по соседству с ними располагаются такие чувствительные к шуму здания, как школы, библиотеки, жилые здания. При традиционном поверхностном расположении промышленного объекта между ними и другими зданиями должна быть создана буферная зона. При подземном расположении объекта такая зона может быть исключена, что существенно уменьшит площадь, необходимую для строительства (рис. 1.3).

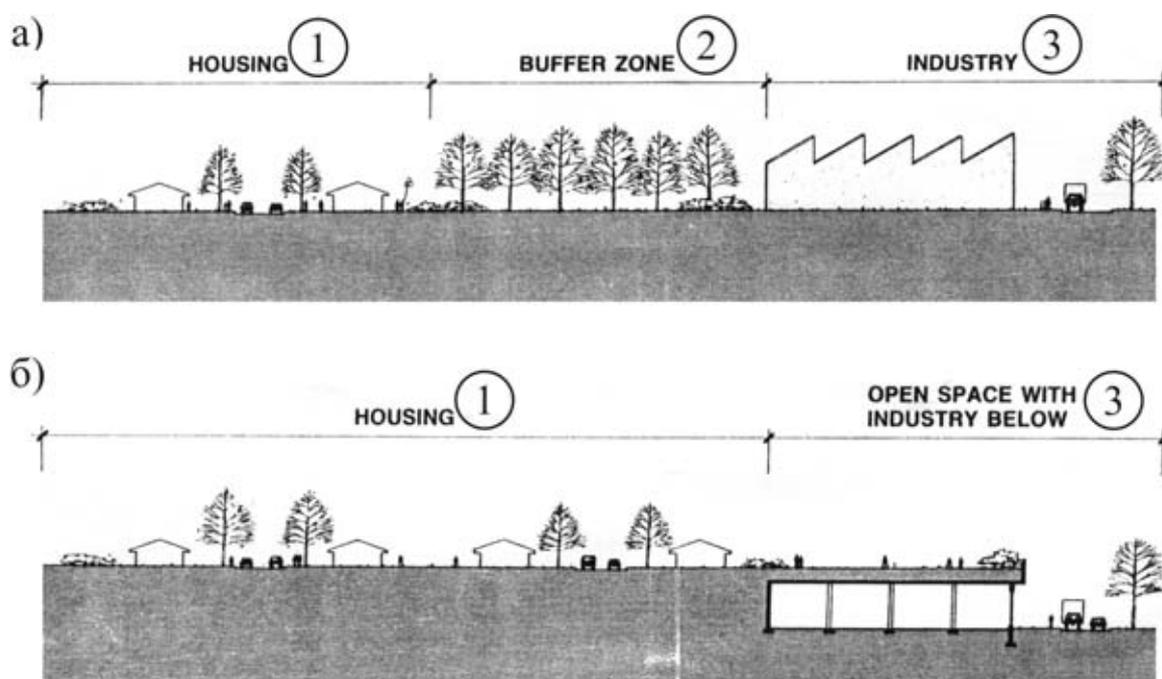


Рис .1.3. Сокращение территории строительства при подземном расположении объекта

а – буферная зона при поверхностном расположении; б – сокращенная территория промышленной зоны; 1 – жилая зона; 2 – буферная зона; 3 – промышленный объект

Преимуществом подземного (заглубленного) расположения зданий является возможность их строительства на крутых склонах холмов. Если здание обычного типа может быть построено на склоне не более 20% (11^0), то заглубленное здание может быть построено на склоне, превышающем 50% (27^0).

Подземные сооружения, построенные шахтным способом, т.е. через определенные точки с поверхности, применимы в наиболее густо населенных районах с минимальными нарушениями поверхности.

Достоинства подземных (заглубленных) сооружений по отношению к окружающей среде очевидны. Эти сооружения позволяют также экономить энергию для обогрева, или, наоборот охлаждения помещений. В общем случае, чем глубже расположение сооружения, тем больший эффект достигается в экономии энергии за счет лучшей изоляции объекта от внешнего климата.

Такие сооружения также более надежны по сравнению с поверхностными зданиями по отношению к природным катаклизмам – ураганам, торнадо, землетрясениям, более устойчивы к опасности пожаров, более безопасны при военных конфликтах или террористических актах. Благодаря ограниченному количеству входов, может быть обеспечен максимальный уровень безопасности здания. Это особенно важно, когда подземное (заглубленное) сооружение используется для хранения ценностей, записей, рукописей, аварийных запасов пищи или топлива.

Стоимость заглубленного здания, построенного открытым способом, сопоставима со стоимостью обычного наземного. Экономия для заглубленного здания достигается за счет отделочных материалов – стекла, металла, кирпича – особенно, для строений больших размеров. Уменьшается также стоимость оборудования отопления или охлаждения заглубленного здания по сравнению с обычным.

Сооружение подземного объекта принципиально отли-

чается от обычного строительства как по стоимости, так и по применяемым методам, которые в значительной степени определяются горно- и гидрогеологическими условиями. Высокая стоимость строительства может быть снижена, например, за счет продажи извлеченных горных пород. Другим путем экономии является сооружение подземных комплексов через горизонтальные туннели взамен вертикальных шахт с последующим их использованием в качестве постоянных входов-выходов. При подземном строительстве сокращаются затраты на несущую конструкцию сооружения, его функции в значительной мере выполняет внутренняя оболочка подземной полости. Нарушения поверхности снижаются до минимума, поскольку относятся только к участкам входа-выхода строящегося сооружения.

Основным препятствием для подземного строительства являются не объективные трудности размещения структур под землей, а субъективные факторы – психологические трудности восприятия замкнутости пространства. Есть несколько причин по объяснению причин этого феномена. Одна из них связана со смертью и похоронами, другая – со страхом быть заваленным и оказаться в западне. Люди также часто ассоциируют подземное пространство с плохо проветриваемым подвалом неприятного внешнего вида. Некоторые страдают клаустрофобией.

Объективными недостатками таких сооружений является ограничение натурального света и наружного обзора окрестностей. В последнее время появились проекты и сооружения, где свет и обзор поверхности могут быть переданы средствами оптических линз и зеркал. Следует, однако, заметить что свет и обзор требуются не для всех видов деятельности. Офисы, библиотеки и госпитальные помещения зачастую вообще обходятся без окон. Для некоторых функций окна нежелательны – например, в театрах, где они могут отвлекать внимание или складских помещениях, где работает малое количество людей.

По сравнению с наземными, подземные и заглубленные помещения требуют специальных решений по доступу и перемещению людей, особенно, при их большом количестве, например, для торговых центров, учебных помещений – классов и аудиторий, театров, церквей, спортивных арен. Поэтому размеры входов, коридоров, фойе, въездных рамп, эскалаторов, лестниц должны соответствовать людским потокам. Подобные же соображения относятся к грузовым потокам. Дополнительные трудности возникают в связи с необходимостью обеспечения стоянки транспортных средств.

Другой проблемой, характерной для подземных сооружений, является необходимость их принудительного проветривания. Количество свежего воздуха, подаваемое в здание, зависит от числа людей, находящихся в нем. Наибольший объем воздуха должен поступать в аудитории, театры, учебные помещения. Такие же требования предъявляются к производствам, выделяющим нежелательные запахи – гаражам, стоянкам автомобилей, некоторым видам производств.

Более сложным, чем для традиционного здания, является вопрос охлаждения воздуха, что объясняется большим количеством тепла, выделяемым в замкнутом пространстве от освещения, людей и машин. Вместе с тем, погруженные в землю стены здания адсорбируют тепло и помогают охладить в нем воздух.

Из-за того, что грунт, окружающий здание, почти всегда холоднее, чем температура внутреннего воздуха, в интерьере здания может произойти конденсация влаги.

У подземных и заглубленных зданий, особенно расположенных ниже уровня грунтовых вод, выше, чем у обычных зданий, опасность их просачивания. Поэтому подземные сооружения требуют применения качественной водонепроницаемой изоляции.

Одним из главных условий подземного и заглубленного строительства является достоверность знаний о свойст-

вах горных пород, что влияет на определение предварительной стоимости объекта и технологию строительных работ. Эти проблемы возрастают с глубиной структуры.

Подземные работы обычно воспринимаются, как рискованные зоны строительства и развития, где стоимость работ, как правило, высока. Однако, исследования, проведенные в Великобритании в 2001 г. показали, что, благодаря новым технологиям, стоимость туннельного строительства падает с темпом около 4% в год. Стоимость городских туннелей сейчас составляет около 80 млн. евро за километр и может скоро оказаться дешевле, чем поверхностное строительство, где стоимость земельных участков и выноски существующих коммуникаций весьма высоки. Проходка туннелей становится особенно экономически эффективной в благоприятных геологических условиях и при наличии предыдущего опыта такого строительства. Например, проходка туннеля метро в Хельсинки потребовала всего около 10 млн. евро на километр.

1.3 Некоторые сведения о выборе строительных решений

Строительство подземного объекта начинается с тщательного изучения ожидаемых геологических, гидрогеологических и сейсмических условий, поскольку не соответствующие им технические решения, могут привести к дополнительным затратам и увеличению продолжительности строительства.

Важно также иметь информацию о существующих подземных структурах и инженерных коммуникациях для того, чтобы определить наиболее подходящее место расположения проектируемого объекта, способ строительства и предосторожности, которые должны предусматриваться в ходе строительства, особенно в городских районах.

Затем принимаются проектные решения по параметрам

объекта, направлениям его осей, конфигурации полостей и методам строительства.

На рис. 1.4 показана зависимость уровня напряженного состояния горных пород (горного давления) от места расположения подземной полости. Опыт, накопленный в Норвегии при туннельных работах и сооружении разного рода полостей, показывает, что проблемы с их поддержанием возникают, как правило, в зонах геологических нарушений, при глубине расположения более 500 м и углах горных склонов более 25° . От величины горного давления зависит форма и размер полости, материал и конструкция ее крепи. Глубина расположения подземного объекта определяет также технологию строительства. При небольшой глубине может применяться открытый способ, когда выемка грунта осуществляется экскаваторами, установленными на поверхности.

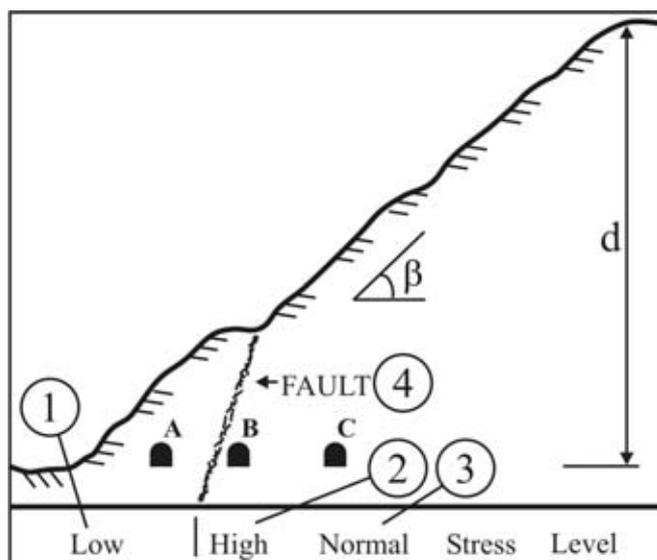


Рис. 1.4. Зависимость уровня напряженного состояния горных пород от места расположения подземной полости

1 – зона низкого уровня напряженного состояния; 2 – зона высокого уровня; 3 – зона нормального уровня; 4 – геологическое нарушение

При глубоком расположении должны применяться буровзрывной способ, проходческий комбайн или буровая туннельная машина.

Подземные условия влияют также на взаимное расположение полостей. Так, основные машинные залы подземной гидроэлектростанции Мингтан (Mingtan), Тайвань по первоначальному варианту проекта были ориентированы с расположением шлюзов и туннелей в одну линию, что было самым экономичным решением. Однако, при этом оказа-

лось, что проектируемые полости пересекают под острым углом несколько нарушенных зон горных пород (рис. 1.5), что могло существенно снизить устойчивость кровли и стен. Поэтому весь подземный комплекс был повернут на 26° так, чтобы будущие машинные залы располагались почти перпендикулярно плоскостям нарушений. На рис. 1.6 (цветная вкладка) дана изометрическая модель взаимного расположения подземного комплекса и нарушенной зоны, показанной красным цветом.

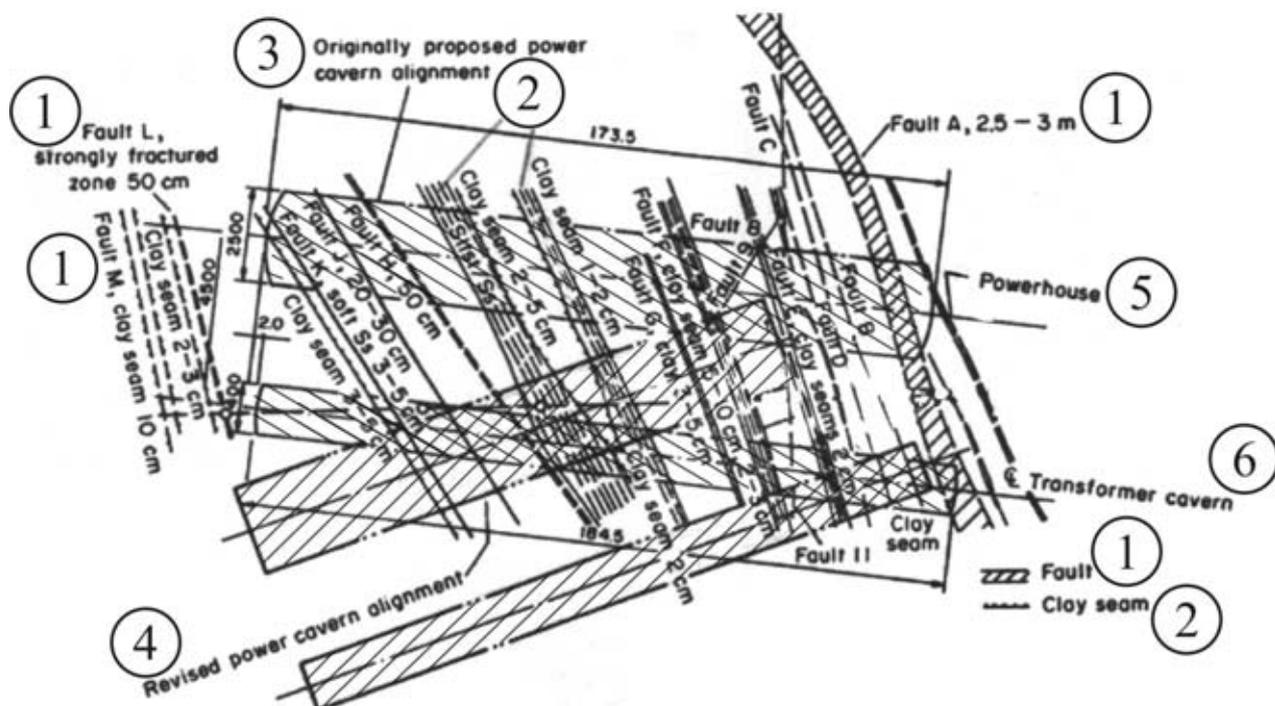


Рис. 1.5. Разворот подземного комплекса гидроэлектростанции Мингтан перпендикулярно плоскости зон нарушений

1 – геологические нарушения; 2 – слои глины; 3 – первоначально принятые направления комплекса; 4 – пересмотренное направление комплекса; 5 – машинный зал; 6 – трансформаторный зал

В ранних проектах подобных комплексов все оборудование располагалось в одном машинном зале, что требовало весьма значительной его ширины и соответственно дорогостоящих мер по увеличению устойчивости подземной полости. В дальнейшем было решено использовать два отдельных зала, в одном из которых устанавливались турби-

ны, а в другом – трансформаторы, что позволило уменьшить пролеты полостей и упростить их крепь.

Как уже указывалось, с учетом конкретных условий выбирается также форма сечения подземной полости. Для этой же электростанции Мингтан рассматривались три следующих варианта (рис. 1.7 цв. вкл.):

- грибообразная форма с арочной кровлей;
- подковообразная кровля с вертикальными стенами;
- эллиптическая форма.

Анализ вариантов показал, что грибообразная форма потребует больших затрат на крепление полостей. Наименьшие напряжения в горном массиве обеспечиваются эллиптической формой, но они незначительно отличаются от напряжений в сечении с вертикальными стенами и подковообразным сводом, которое было окончательно выбрано, как более простое для строительства.

В зависимости от устойчивости горных пород выбирается также расстояние между полостями.

На рис. 1.8 (цв. вкл.), 1.9 (цв. вкл.) приведены цифровые модели, показывающие соответственно схему необходимого усиления анкерной крепью пород, окружающих полость электростанции Мингтан, и потерю несущей способности породного массива.

Работы по сооружению подземной полости начинаются обычно с проходки передовой горизонтальной выработки, являющейся частью ее сечения (рис. 1.10 а), и вертикальной шахты, через которую затем строится и обслуживается комплекс. Для сооружения шахты вначале поверхность и передовая выработка соединяются вертикальной пилотной скважиной большого диаметра, которая затем расширяется до проектных размеров шахты (рис. 1.10 б), что показано на примере строительства комплекса хранения сырой нефти в Монгстаде (Mongstad), Норвегия. Возможное расположение оборудования при круглом и эллиптическом сечениях шахты показано на рис. 1.11.

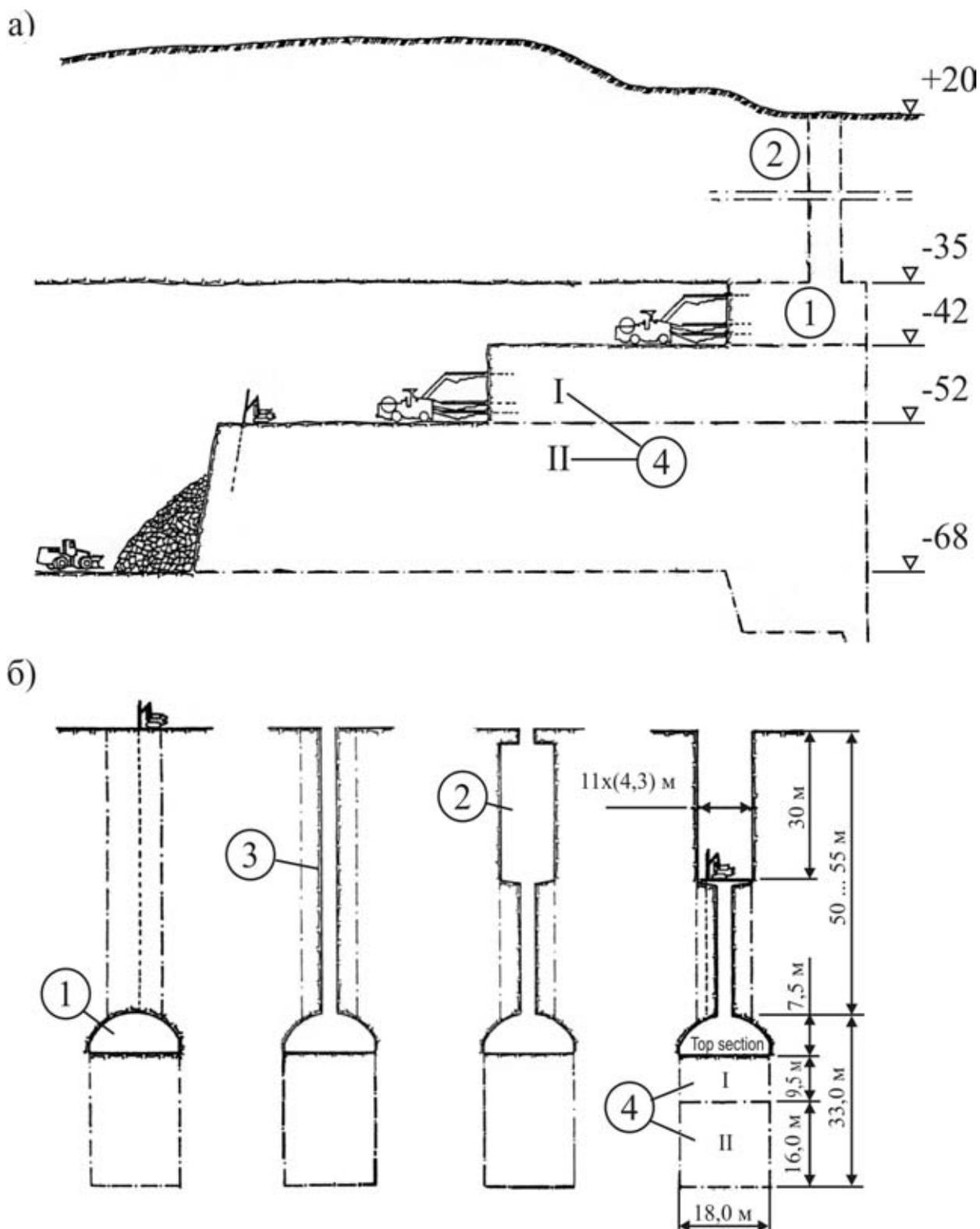
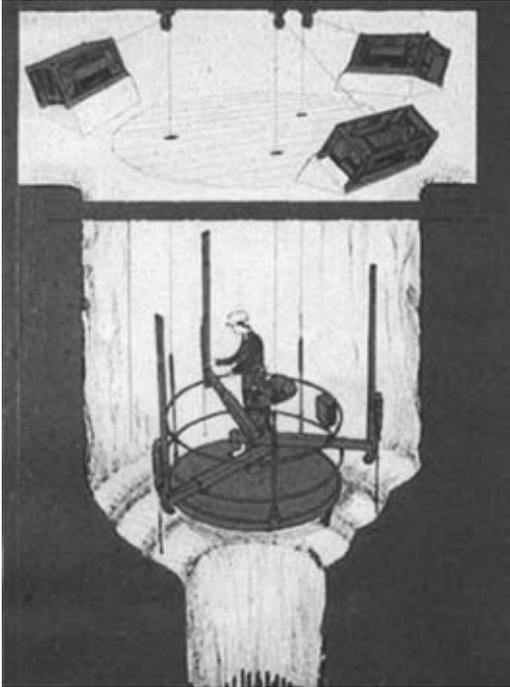


Рис. 1.10. Стадии проходческих работ по строительству полости большого размера

1 – передовая выработка; 2 – вертикальная шахта; 3 - пилотная скважина; 4 – стадии последовательного расширения подземной полости

а)



б)

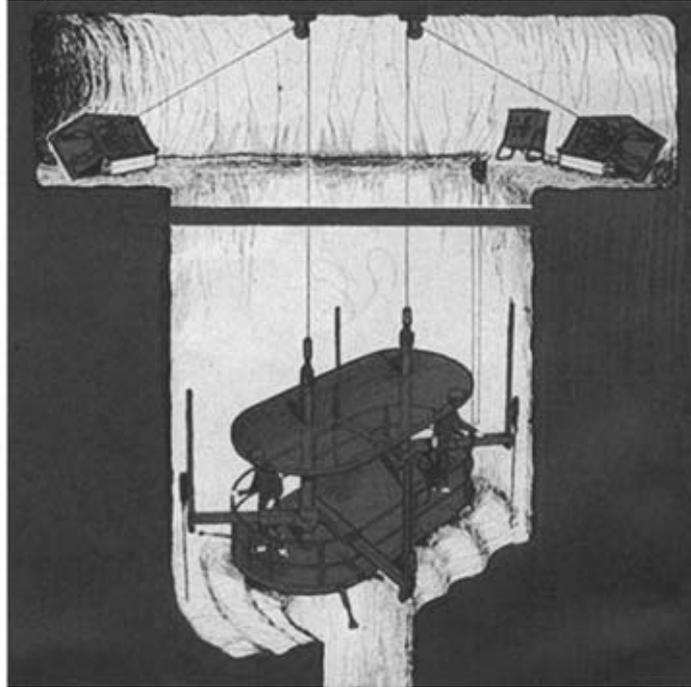


Рис. 1.11. Расположение оборудования при расширении шахты
а – круглое сечение; б – эллиптическое сечение

На следующих этапах последовательными стадиями увеличивается сечение сооружаемой полости.

Более сложная очередность проходческих работ была применена на строительстве подземной гидроэлектростанции в Рио-Гранде (Rio Grande), Аргентина (рис. 1.12).

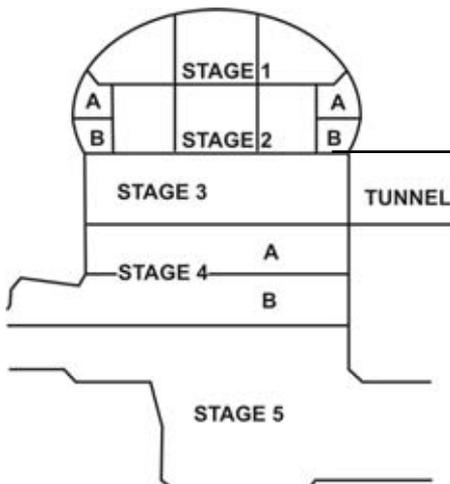


Рис. 1.12. Стадии строительства подземной гидроэлектростанции в Рио-Гранде (Аргентина)

Подземные полости большого сечения проходятся обычно с использованием буровзрывных работ или проходческих комбайнов. В первую очередь в забое бурятся скважины, заряжаемые взрывчатым веществом. Отбитая при его взрыве порода грузится погрузочной машиной в транспортное средство (автомобили, самоходные или рельсовые вагонетки) и вывозится из забоя. Последовательность операций при та-

кой технологии показана на рис. 1.13 (цв. вкл.). На рис. 1.14 (цв. вкл.) показано расположение оборудования при бурении скважин, а на рис. 1.15 (цв. вкл.) расположение этих скважин в забое. После погрузки породы производится крепление очередного участка полости анкерной крепью и набрызгбетоном. На рис. 1.16 показана часть кровли полости, удерживаемая стальными полосами, прикрепленными к кровле анкерными болтами. Затем производится покрытие кровли и стен полости набрызгбетоном.

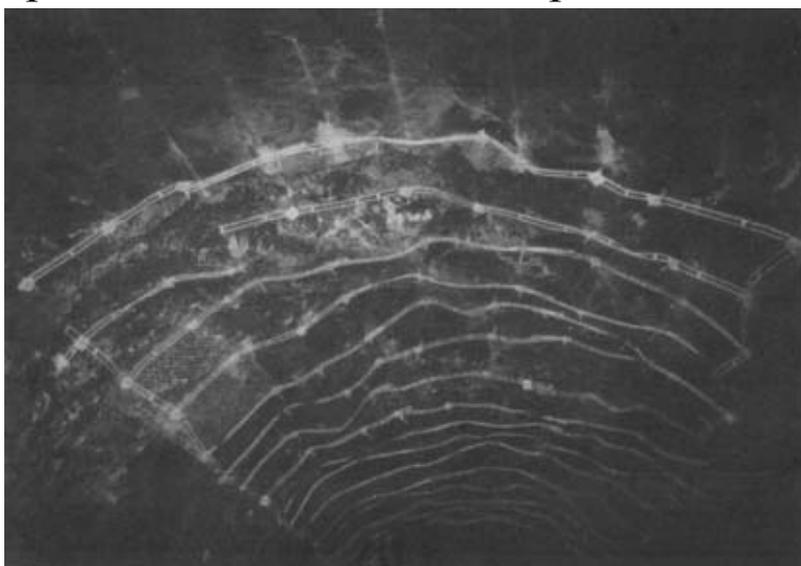


Рис. 1.16. Стальные полосы на анкерных болтах, поддерживающие кровлю полости

На рис. 1.17 (цв. вкл.) показана подземная полость после проведения взрывных работ, на рис. 1.18 (цв. вкл.) окончание формирования арочной кровли этой полости.

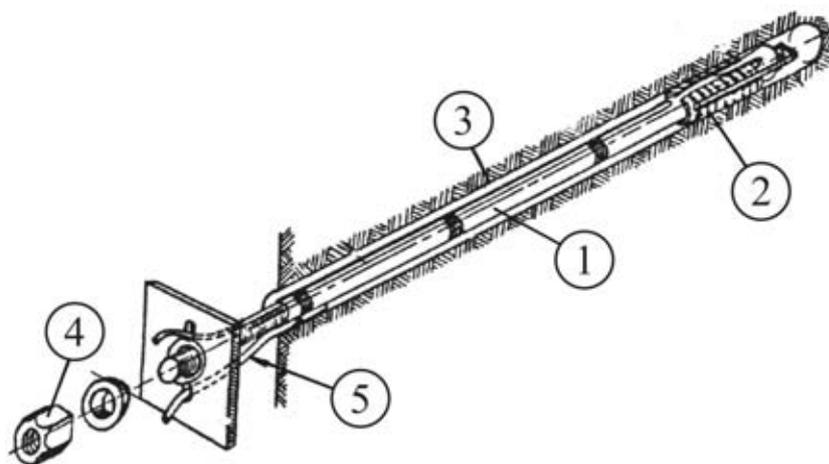


Рис. 1.19. Конструкция типичного анкерного болта

1 – штанга; 2 – расклинивающая головка-якорь; 3 – скважины; 4 – гайка; 5 – труба для подачи в скважину скрепляющего состава

Типичный анкерный болт изображен на рис. 1.19 и состоит из штанги с расклинивающейся головкой – якорем. Для его установки в кровлю и стенки полости бу-

рится скважина длиной равной толщине слоя ослабленных пород, примыкающих к полости. При установке анкерного болта якорь расклинивается, фиксируя положение болта в скважине. На винтовой конец штанги, выступающий из скважины, навинчивается гайка, стягивая болтом перебу- ренные скважиной неустойчивые слои породы. По трубам, соединенным с якорем, в скважину подается цементный или химический раствор, дополнительно к анкерному болту скрепляющий эти слои. Раствор, кроме того, предохраняет болт от коррозии. В некоторых модификациях анкерный болт изготавливается полым, и скрепляющий раствор подается в скважину через эту полость. Вместо жесткой штанги, несущей якорь, может быть применен металлический трос, что позволяет увеличить слой скрепляемых пород.

На рис. 1.20 показаны варианты установки анкерной крепи в стандартных туннельных сечениях при низком и высоком значениях горного давления и при разных характеристиках горных пород – от монолитного массива до весьма трещиноватых структур.

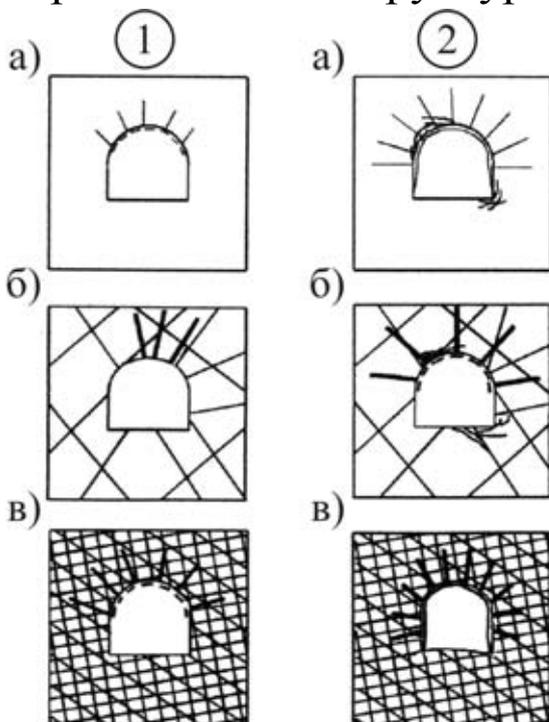


Рис. 1.20. Варианты установки анкерной крепи
 1 – при низких значениях горного давления; 2 – при высоких значениях горного давления; а – в монолитном массиве; б – в трещиноватых породах; в – в весьма трещиноватых породах

На рис. 1.21 показаны стадии проходки и установки анкерной крепи в полости большого сечения шириной 25 м и высотой 24 м для гидроэлектростанции Мингтан (Тайвань). На первой стадии (рис. 1.21 а) проходила разведочная дренажная галерея, расположенная на 10 м

выше свода будущей полости, и две продольных вспомогательных галереи в контуре свода. Из галерей по сетке 2х2 м были установлены тросовые анкера, натянутые и зацементированные в скважинах. На второй стадии под защитой этих анкеров проходила передовая выработка размерами 6х6 м, расширенная затем до размера свода строящейся полости (рис. 1.21 б). В необходимых местах устанавливалась дополнительная анкерная крепь с жесткими штангами. Свод полости покрывался также слоем набрызгбетона толщиной 50 мм. На третьей стадии (рис. 1.21 в) проходились следующие нижележащие слои полости высотой по 2,5 м с установкой анкерной крепи в бока полости. На последней стадии (рис. 1.21 г) полость достигала проектного сечения. Кровля и верхняя часть стен покрывалась дополнительным слоем набрызгбетона так, что его полная толщина достигала 150 мм. На остальных участках стены полости покрывались набрызгбетоном с толщиной слоя 50 мм. Был смонтирован также мостовой кран для инспекторского доступа к кровле.

Набрызгбетон является вторым после анкерной крепи наиболее распространенным способом крепления полостей. Укладка бетонной смеси осуществляется машинами разных типов (рис. 1.22 а, б). Работа по нанесению набрызгбетона показана на рис. 1.23 (цв. вкл.). В случае необходимости,

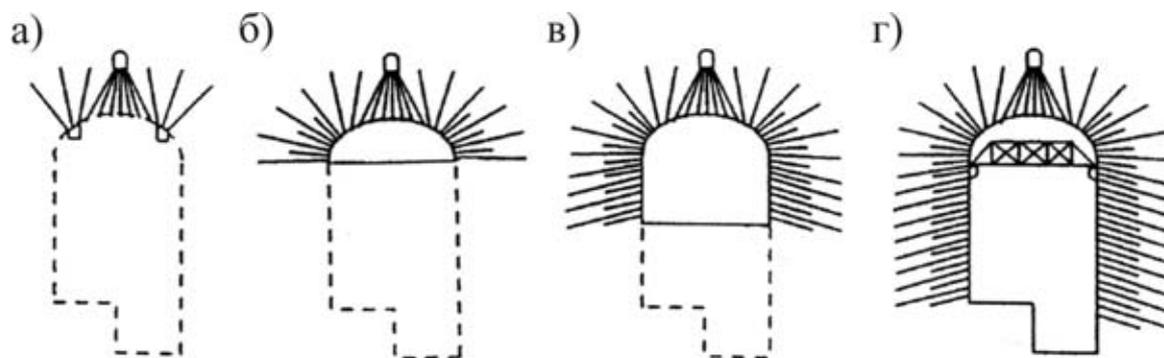


Рис. 1.21. Стадии проходки и установки анкерной крепи в полости большого сечения

а – проходка разведочно-дренажной и вспомогательных галерей;
 б – проходка передовой выработки; в, г – расширение полости до проектного сечения

как уже говорилось, набрызгбетон может быть усилен предварительной установкой стальных полос или металлической сетки, прикрепляемой к поверхности породы анкерными болтами.

Как говорилось ранее, отбойка и погрузка породы в подземных полостях, кроме буровзрывных работ, может также осуществляться проходческими комбайнами (рис. 1.24 цв. вкл.). Протяженные выработки, такие, как туннели разного назначения, проходятся обычно буровыми туннельными машинами (рис. 1.25 цв. вкл.).

Строительство полости большого сечения показано на рис. 1.26 (цв. вкл.).

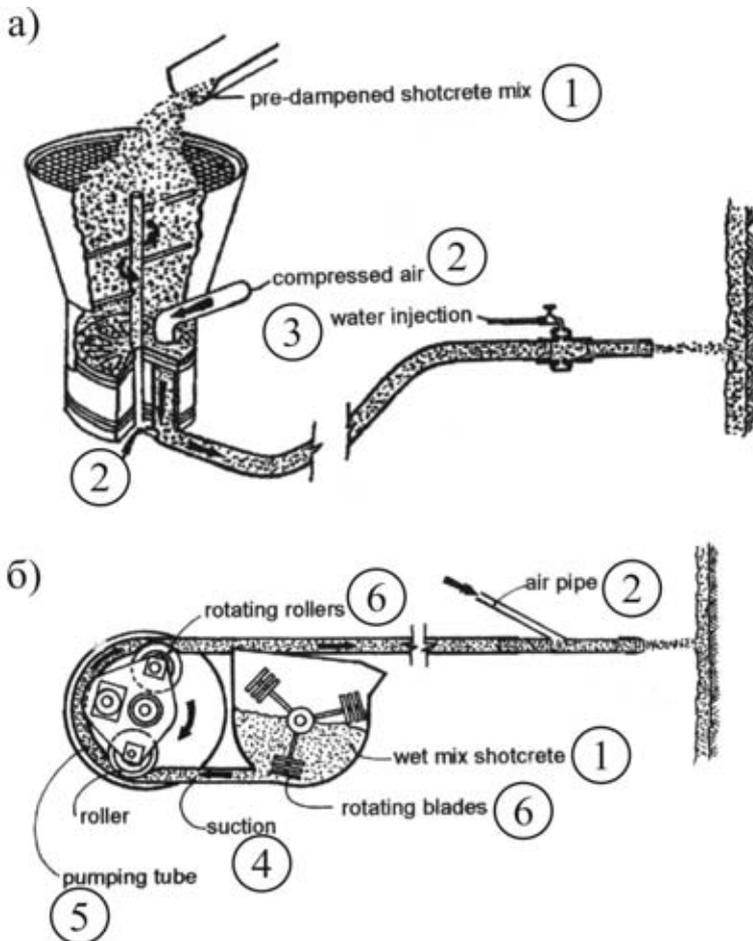


Рис. 1.22. Машины для нанесения набрызг-бетона
 а – изометрическая проекция одного из видов машин; б – схема работы машины; 1 – предварительно увлажненный бетон; 2 – сжатый воздух; 3 – впрыскивание воды; 4 – всасывание; 5 – подающая труба; 6 – вращающиеся диски

ГЛАВА 2. ПОДЗЕМНОЕ ХРАНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

2.1 Хранилища природного газа и нефтепродуктов

Природный газ играет преобладающую роль в мировой системе энергоснабжения. Он составляет около 37% от общего энергопотребления в Северной Америке и 47% в Западной Европе. Добыча и транспортировка газа занимают время и, при достижении места назначения он не всегда оказывается нужен «с колес». В этих случаях его приходится направлять в подземные емкости. Такое же решение принимается в связи с сезонным характером потребления газа. Спрос на него обычно повышается зимой, когда он используется для отопления. Так, например, во Франции 7 февраля 1991 г. из подземных резервных хранилищ поступило 57,5% общего объема потребляемого газа. В последние годы, однако, в связи с ростом расхода электроэнергии в летний период на кондиционирование воздуха, дополнительное количество газа может быть востребовано и в этот сезон. Хранимый газ используется также при каких-либо непредвиденных обстоятельствах, например, природных катастрофах, когда может понадобиться его аварийный расход.

Газохранилища являются буфером между производителем и потребителем, возможности и нужды которых, как правило, не совпадают. Наконец, с коммерческой точки зрения целесообразно отправлять газ на хранение при низком уровне цен и, наоборот, увеличивать его продажу при их подъеме.

Природный газ в большинстве случаев хранится под землей под давлением в трех типах хранилищ:

- опорожненные полости нефтяных или газовых месторождений;
- водоносные слои горных пород;
- полости в соляных формациях.

Иногда для хранения газа используют также старые отработанные шахты.

Каждое из этих хранилищ имеет свои физические характеристики (пористость, проницаемость, способность удерживать газ) и экономические особенности (стоимость подготовки к хранению, доставочную способность, т.е. скорость отдачи газа, эксплуатационные расходы). Эти качества определяют применимость каждого способа хранения для конкретных условий. Наиболее важные характеристики подземных хранилищ – способность удерживать природный газ в течение длительного времени и производительность, с которой газ может быть извлечен.

Далее описаны различные типы хранилищ рис. 2.1 (цв. вкл.), их расположение на территории США показано на рис. 2.2 (цв. вкл.)

Самый распространенный метод подземного хранения газа и, часто наиболее дешевый, - использование отработанных месторождений газа или нефти (рис. 2.3 а). Впервые такой способ хранения был применен в Онтарио, Канаде, в 1915 г. Здесь использовалось бывшее газовое месторождение. В США первое подобное хранилище было расположено под г. Буффало (Buffalo), штат Нью-Йорк. К 1930 г. уже существовало 9 хранилищ в 6 разных штатах. Примерно до 1950 г. весь природный газ хранился подобным образом. В настоящее время в мире используется 448 бывших месторождений. Их достоинствами являются, кроме всего, хорошая изученность геологических характеристик, а также возможность эксплуатации уже имеющегося оборудования, применявшегося при добыче газа.

Приемлемость старых месторождений для хранения газа определяется географическими и геологическими факторами. Географически такие хранилища должны быть расположены относительно близко к потребляющим регионам, к транспортной инфраструктуре, включая газовые магистра-

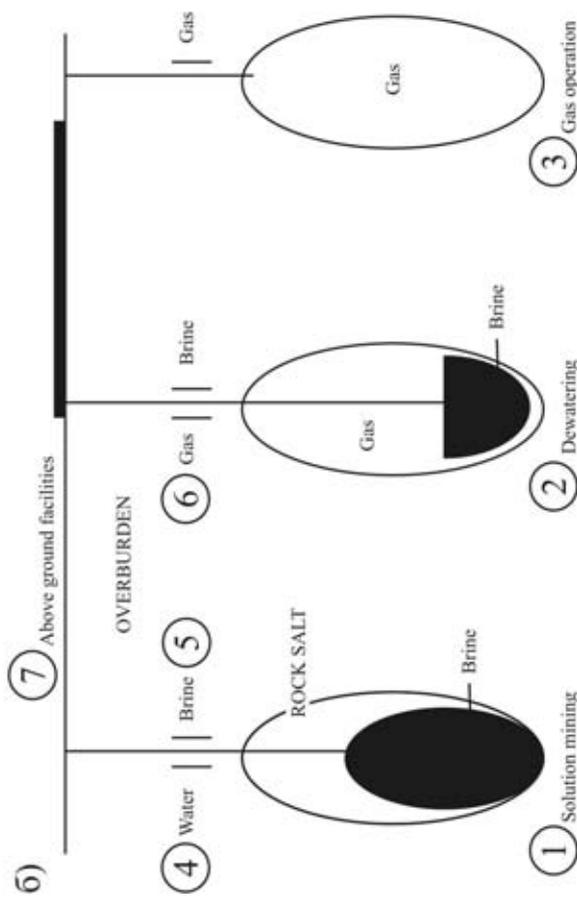
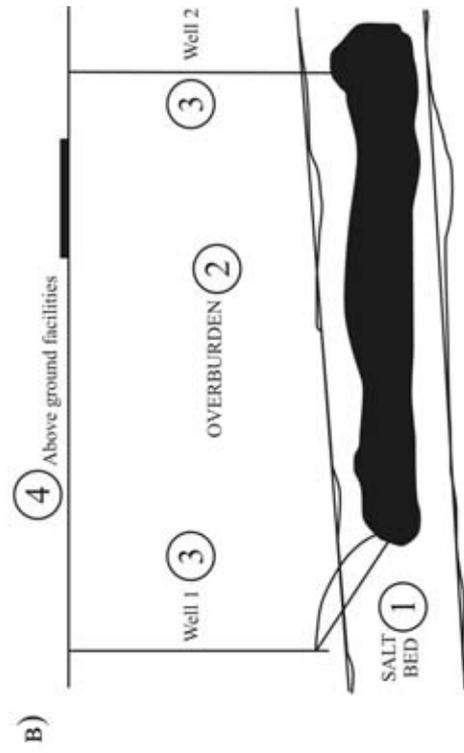


Рис. 2.3. Эскизы различных типов хранилищ природного газа

а – отработанное нефтяное (газовое) месторождение или водоносный пласт горных пород; 1 – непосредственная кровля; 2 – перекрывающая толща; 3 – производственные скважины; 4 – скважины наблюдения; 5 – наземные здания и сооружения; **б** – полость в соляном куполе; 1 – формирование полости; 2 – наполнение газом и откачка рассола; 3 – хранение газа; 4 – вода; 5 – рассол; 6 – газ; 7 – наземные здания и сооружения; **в** – полость в соляном пласте; 1 – соляной пласт; 2 – перекрывающая толща; 3 – скважины; 4 – наземные здания и сооружения

ли. Геологические формации старых месторождений должны быть пористыми и иметь высокую проницаемость. Пористость определяет количество хранимого газа, проницаемость – скорость, с которой хранилище отдает газ.

В качестве хранилища могут служить водоносные слои горных пород, которые представляют из себя пористые, проницаемые формации, работающие как природные водные резервуары. В определенных ситуациях эти водосодержащие породы могут быть приспособлены для хранения природного газа, хотя их использование обходится дороже, чем старых месторождений нефти и газа.

Хранение природного газа в водоносных слоях впервые было испытано в 1946 г. в штате Кентукки (Kentucky), США. Сегодня в мире существует 76 таких хранилищ, из них большинство в США, бывшем Советском Союзе и Франции. Хранение газа в осадочных водоносных породах осуществляется, если они перекрыты непроницаемыми слоями.

После принятия решения о создании такого типа хранилища должна быть развита его инфраструктура: пробурены необходимые скважины, построены компрессорные станции и сеть трубопроводов, установлено обезвоживающее оборудование, вспомогательная и контрольная аппаратура. Подготовка и обустройство такого хранилища может занять до 4 лет, тогда, как при использовании бывших месторождений – вдвое меньшее время.

Еще одним типом хранилищ природного газа являются соляные месторождения. Искусственно сформированные здесь полости являются надежными емкостями, предотвращающими утечки газа. Соляные залежи имеют формы куполов и пластов (рис. 2.3 б, в). Купола могут иметь диаметр до 2 км и высоту до 10 км. Обычно такие купола используются для хранения газа на глубинах от 2 км до 0,5 км, хотя в определенных обстоятельствах они могут быть намного ближе к поверхности. Пластовые залежи имеют мощность

не более 300 м. Созданные здесь полости более дороги, чем в куполах и более склонны к ухудшению состояния.

Первые соляные полости были использованы в США – г. Мэрисвил (Marysville), штат Мичиган в 1961 г., Канаде – г. Мелвилл (Melville), провинция Саскачеван в 1964 г., Армении – г. Абовян (Abovian) – в 1964 г., Германии – г. Киль (Kiel) в 1969 г. и Франции – г. Терсан (Tersanne) в 1968 г. Их объем был сравнительно невелик (30...100 тыс. м³) из-за осторожности инженеров. В 1970 гг. с ростом опыта сооружения и эксплуатации соляных полостей их емкость увеличивалась до 200...400 тыс. м³, а в 1980 гг. – до 300...600 тыс. м³ во Франции и Германии и достигла 1 млн. м³ в США в 1990 гг. Сегодня в мире существует 54 хранилища такого типа, из них – 26 в США.

Когда нужная залежь выбрана, в ней создается полость. Для этого в соляную формацию пробуривается скважина и через нее закачивается пресная вода, растворяющая соль и затем выдаваемая на поверхность. Этот процесс требует двух труб, вставленных друг в друга, через одну из которых подается вода. Через кольцевой зазор между трубами выводится рассол. При этом принимаются различные меры для удержания полости в пределах планируемых очертаний, например, создание «дизельной» подушки из нефтепродуктов (рис. 2.4 цв. вкл.). После достижения полостью нужных размеров производится ее наполнение газом с одновременным вытеснением рассола (рис. 2.5 цв. вкл.). Газ накачивается через кольцевой зазор между трубами, вставленными одна в другую, а рассол откачивается через внутреннюю трубу или наоборот. Общий процесс сооружения полости и откачки рассола занимает от 18 месяцев до нескольких лет.

Собственно сооружение соляных полостей растворением соли пресной водой составляет 25...35% общего объема инвестирования. Этот процесс требует 7...9 м³ воды на 1 м³ полости, а концентрация соли в рассоле, откачиваемом на поверхность, составляет 260...310 кг/м³. Рассол использует-

ся в химической промышленности или сбрасывается в океан.

Описанный способ стоит дороже остальных, но обеспечивает надежное хранение газа. Соляные месторождения, а значит, и купольные хранилища газа в США сосредоточены вдоль побережья Мексиканского залива.

Подобные полости могут также создаваться в соляных пластах мощностью 150...300 м. Даже при мощности 60...100 м еще возможно создать такую полость, хотя ее емкость будет невелика – 50...100 тыс. м³. Однако, многие районы мира имеют соляные пласты мощностью менее 60 м. Для их использования в качестве газохранилищ направленно бурятся горизонтальные скважины, через которые производится растворение соли, что позволяет создать протяженные хранилища, объем которых составляет 100 тыс. м³ ÷ 1 млн. м³. Главная трудность сооружения такого хранилища заключается в том, что соляные слои в этих условиях перемежаются нерастворимыми породами.

Одним из отличий хранения природного газа в соляной полости по сравнению с отработанным нефтяным или газовым месторождением или водоносным слоем, имеющим большое простирание, является количество скважин, обслуживающих хранилище. Если для купольной полости достаточно одной скважины, то для других хранилищ количество скважин определяется их размерами.

В случае пожара на скважине купольная полость с ее единственным обслуживающим устройством полностью теряет объем газа и оказывается поврежденной, как это случилось 18 августа 2004 г. в хранилище Мосс Блафф (Moss Bluff), Техас, США (рис. 2.6 а, б цв. вкл.).

В хранилищах, обслуживаемых несколькими скважинами и устройствами приема, подобная авария не влечет за собой таких тяжелых последствий (рис. 2.6 в цв. вкл.).

В странах, где отсутствуют необходимые геологические условия для создания описанных соляных хранилищ

газа, разработана технология его хранения в полостях обычных пород. Такое хранилище сооружается горнопроходческими способами, например, буровзрывными работами (рис. 2.7). Его внутренняя поверхность при неустойчивых породах должна быть закреплена, однако, как правило, для него стараются выбрать такие окружающие породы, которые не требуют крепления.

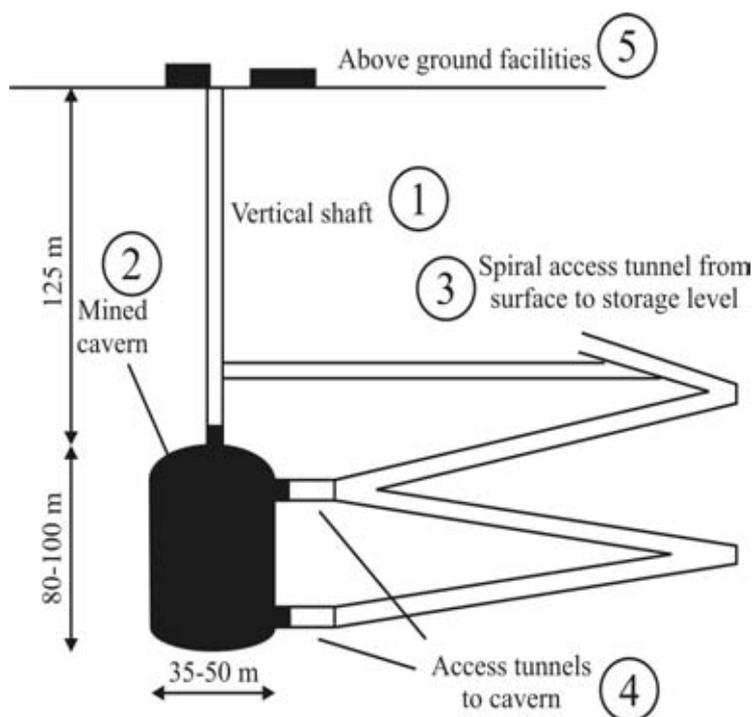


Рис. 2.7. Закрепленная полость, пройденная шахтным способом
 1 – вертикальная шахта; 2 – закрепленная полость; 3 – спиральный туннель доступа с поверхности к горизонту хранения; 4 – туннели доступа к полости; 5 – наземные здания и сооружения

Поскольку емкость такого хранилища ограничена по сравнению с другими способами хранения, в нем обычно размещают сжиженный газ или жидкие нефтепродукты, требующие меньших объемов, чем газы.

Сжиженный газ хранится при почти атмосферном давлении и низкой температуре (рефрижераторное хранение), либо под избыточным давлением при температуре вмещающих пород (нагнетательное хранение).

Сжиженные газы – это смесь пропана и бутана. Чистый пропан можно хранить при температуре минус 42°C и атмосферном давлении. При рефрижераторном хранении вмещающие водоносные породы заморожены. При нагнетательном хранении глубина расположения полости и давление газа в ней должны быть выбраны таким образом, чтобы

давление подземных вод превышало последнее, предотвращая таким образом утечки газа. Вместо этого будет наблюдаться небольшое постоянное просачивание в полость воды, постоянно откачиваемой специальными насосами.

Доступ в такую полость осуществляется через шахту, которая должна быть водонепроницаемой, что достигается цементацией пород. От входов полость изолируется бетонными перемычками.

Подземный резервуар обычно состоит из главных туннелей различных сечений от 30 до 500 м², соответствующих характеристикам вмещающих пород, глубине строительства и другим соображениям. Длина таких туннелей зависит от общей конструкции резервуара, который может состоять из нескольких параллельных выработок. Туннели, соединяющие основные емкости, как правило, имеют меньшие сечения, но позволяют передвигаться персоналу и оборудованию, воздуху и воде, а также хранимому продукту при его размещении на разных горизонтах.

Шахта (или шахты), вертикально связывающие поверхность с резервуаром, углублены ниже его уровня, образуя приемный колодец с насосами и трубами для откачки просачивающейся воды. Здесь же обычно располагается водосборник. Для предотвращения утечек газа, шахты доступа заполняются водой, а комплекс управляется дистанционно.

В некоторых случаях требуется обеспечить дополнительную водную нагрузку на резервуар, предотвращающую утечки газа. С этой целью на расстоянии 10...20 м над главными емкостями хранилища проходится специальный туннель (галерея) малого сечения. Из него бурятся горизонтальные или наклонные скважины, обеспечивающие насыщенность водой перебуренной толщи пород.

При необходимости обеспечить устойчивость горных пород, в которых проходится подземный комплекс хранилища, применяется анкерная крепь и набрызгбетон, усиливающие кровлю. Особое внимание при этом уделяется пе-

ресечениям и соединениям туннелей и их встречам с геологическими нарушениями.

В качестве примера можно привести подземный резервуар сжиженного газа, построенный в Сиднее (Sydney), Австралия, буровзрывным способом и состоящий из четырех полостей, имеющих сечение 14×11 м и длину 230 м каждая, а также соединительных туннелей сечениями $5,5 \times 5,5$ м. Общая емкость комплекса составляет 130 тыс. м³.

Другая серия туннелей сечением $4 \times 3,5$ м² общей длиной 700 м, расположенная на 15 м выше хранилища, обеспечивает его водную завесу для предотвращения утечек газа. Завеса создается скважинами, которые позволяют перебуренным породам оставаться насыщенными водой (рис. 2.8 цв. вкл.).

Комплекс хранилища расположен на глубине 135 м и включает в себя шахту доступа персонала, оборудования и материалов диаметром 6 м. Через эту же шахту выдается порода при строительстве полостей. Имеется также дополнительная шахта диаметром 4 м. Обе шахты имеют глубину 150 м и проходились буровзрывным способом с применением цементации закрепного пространства.

На рис. 2.9 (цв. вкл.) показано сооружение водонепроницаемой перемычки, на рис. 2.10 (цв. вкл.) – строительство подземной полости, на рис. 2.11 (цв. вкл.) – общий вид полости хранения сжиженного газа.

Использование подземных полостей для хранения сырой нефти и нефтепродуктов широко применяется в Норвегии. Расположенное в г. Монгстаде (Mongstad) в западной части страны нефтехранилище в перспективе будет состоять из 6 полостей с общей емкостью хранения 1,3 млн. м³ (рис. 2.12), наибольшей когда-либо сооруженной в Норвегии. Часть полостей уже построена. Сырая нефть закачивается в хранилище по трубопроводам длиной 2 км. Оборудование по обслуживанию хранилища опускалось в него по вертикальным стволам сечениями $47,6$ м².

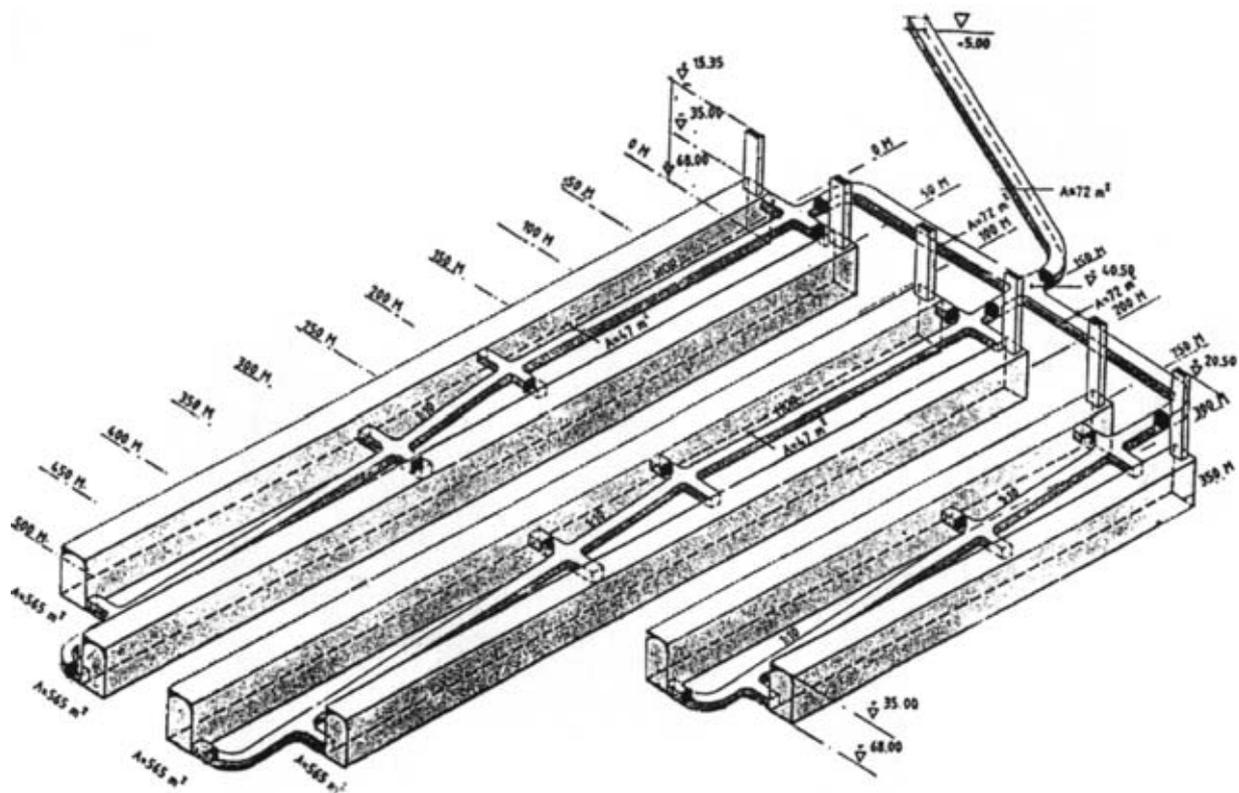


Рис. 2.12. Хранилище нефти в Монгстаде

Каждая полость для прокачивания нефти оборудована двумя высокопроизводительными насосами ($5000 \text{ м}^3/\text{час}$). Главные туннели, подводящие к полостям, имеют ширину 10 м, высоту 7,5 м и сечение 72 м^2 . Эти размеры позволяют обеспечить двухрядное движение для 32-тонных грузовиков. Туннели, расположенные между полостями, имеют ширину 7 м, высоту 7 м и сечения $47,1 \text{ м}^2$, что достаточно для однорядного движения грузовиков. Собственно полости имеют ширину 18 м, высоту 33 м и сечения $565,5 \text{ м}^2$. Такие размеры полостей стали возможны, благодаря высокой устойчивости горных пород. Это же обстоятельство позволило применить для поддержания кровли анкерные болты длиной до 4 м и набрызгбетон с толщиной слоя 50...80 мм. Болты располагались по сетке 3x3 м. Стены, как правило, не крепились и лишь 20...30% общей длины полостей поддерживались анкерными болтами.

Объем хранимой нефти в шести полостях и соединяющих их туннелях составляет примерно $1,7 \text{ млн. м}^3$.

Другим примером подземного хранения нефти в Норвегии является хранилище в г. Стуре (Sture) на севере от Бергена (Bergen), состоящее из пяти параллельных полостей (рис. 2.13), четыре из которых планировались для хранения 550 тыс. м³ нефти, и пятая – для балластной воды. На слое балластной воды располагается нефть в первых четырех полостях. Каждая полость имеет высоту 33 м, ширину 19 м и длину 314 м. Для создания водной завесы пробурена сеть специальных скважин (рис. 2.14).

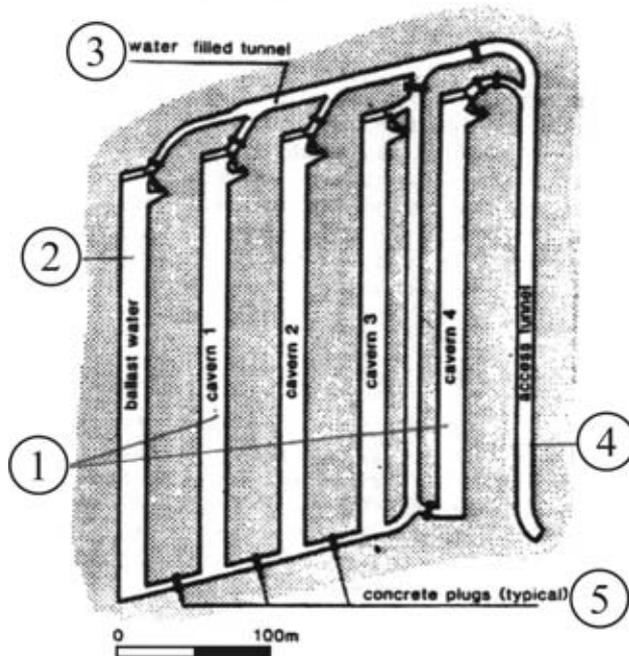


Рис. 2.13. Хранилище нефти в Стуре

1 – полости – хранилища нефти; 2 – полость для балластной воды; 3 – туннель, заполненный водой; 4 – подводный туннель; 5 – бетонные перегородки

тей, расположенных ниже уровня грунтовых вод.

В хранилище используется два следующих принципа хранения. По одному из них верхний уровень хранимого топлива (как правило, автомобильного) сохраняется постоянным, тогда как уровень водной подушки в каждой полости изменяется (рис. 2.15 цв. вкл.). Верх полости сформиро-

Общий объем нефти, хранимой в Норвегии в подземных полостях, приближается к 5 млн. м³.

Крупное хранилище нефтепродуктов создано в Норвегии в районе южного Осло, где в холме Экеберг (Ekeberg) сооружены горизонтальные полости для хранения газа, дизельного топлива и керосина. Почти 50% общего годового расхода нефтепродуктов в стране проходит через это хранилище. Его первая очередь была построена в 1966-69 гг., вторая – в 1975-78 гг. Обе очереди состоят из серии незакрепленных полос-

ван, как горлышко бутылки, и имеет постоянное сечение, чтобы минимизировать площадь поверхности верхнего уровня топлива и уменьшить потери испарения. Водяная подушка состоит из морской воды, закачиваемой из фиорда при выгрузке нефтепродукта. При его приеме вода выкачивается со дна полости. Чтобы избежать загрязнения воды фиорда, откачиваемая вода проходит через нефтяной сепаратор перед сбросом в море.

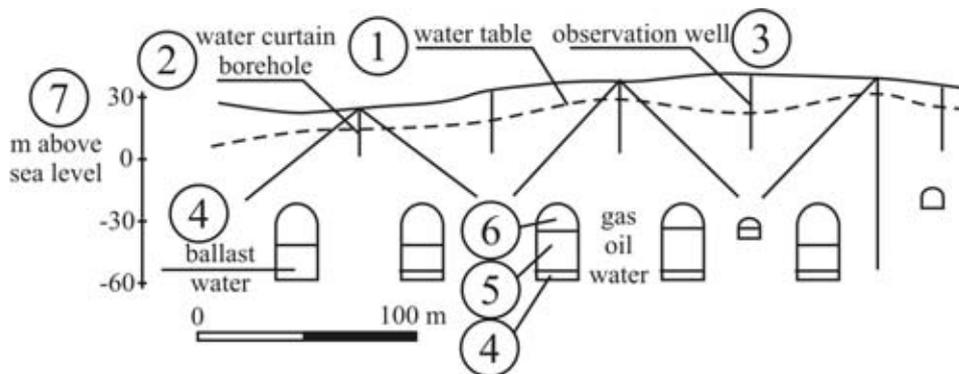


Рис. 2.14. Скважины, пробуренные для создания водной завесы
 1 – уровень грунтовых вод; 2 – скважины; 3 – наблюдательные колодцы; 4 – слой балластной воды; 5 – слой нефти; 6 – слой газа; 7 – высота над уровнем моря, м

По второй схеме (рис. 2.16 цв. вкл.) объем водной подушки постоянен, тогда как уровень хранимого продукта поднимается и опускается в зависимости от его количества. Такой способ применяется для хранения, как правило, авиационного топлива, испарительная способность которого значительно меньше, чем автомобильного.

Строительство полости нефтехранилища показано на рис. 2.17. Еще одной возможностью хранения природного газа является использование выработанного пространства отработанных угольных шахт. Такой способ хранения газа (обычно метана) успешно применяется с 1961 г. Старейший резервуар – закрытая шахта Лейден (Leyden), г. Денвер (Denver), штат Колорадо, США используется до сих пор (рис. 2.18).

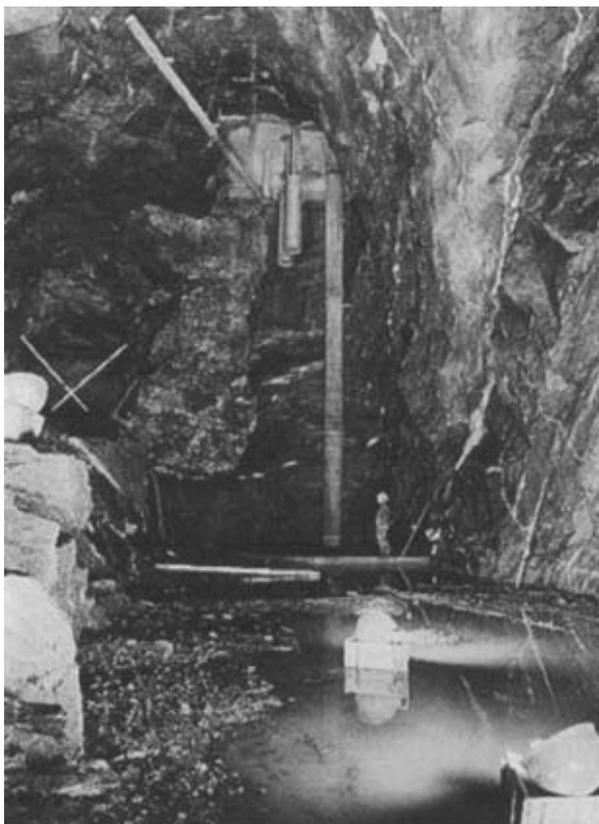


Рис. 2.17. Строительство полости нефтехранилища



Рис. 2.18. Общий вид поверхности шахты Лейден

Шахта Лейден в 1903-1950 гг. разрабатывала два горизонтальных угольных (так называемых лигнитовых, т.е. низкосортных буроугольных) пласта, мощностью 2,4 и 3 м, расположенных на глубине 210...300 м от поверхности на расстоянии 15 м друг от друга (рис. 2.19). Пласты вскрывались четырьмя вертикальными стволами и отрабатывались по камерной системе с оставлением опорных целиков угля между выемочными участками.

Водонасыщенный глинистый сланец и песчаник, в которых залегают угольные пласты, обеспечивают герметичность содержания газа в выработанном пространстве.

Через 8 лет после закрытия шахты, в 1958 г. изучение ее условий показало, что все горные выработки заполнены водой. Были пробурены скважины, через которые проводились видеонаблюдения. Они показали, что отработанная площадь, как и непосредственная кровля мощностью около 15 м, заполнены обрушенными породами. Свидетельства оседания поверхности не были обнаружены.

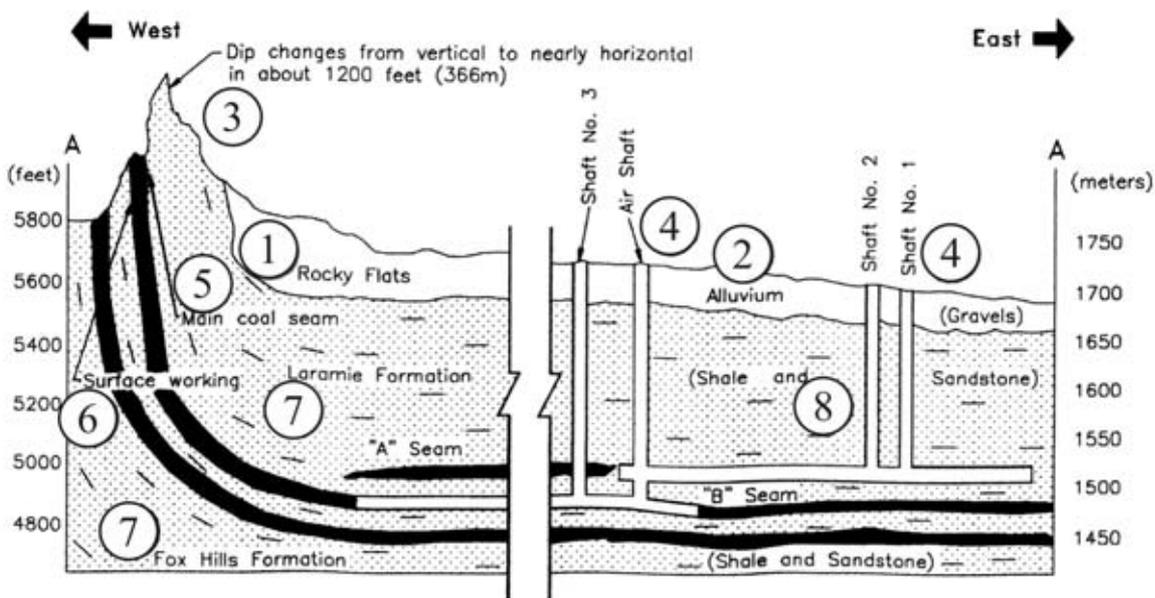


Рис. 2.19. Геологический разрез месторождения шахты Лейден
 1 – каменная равнина; 2 – наносы, гравий; 3 – глубокие изменения залегания от вертикального до почти горизонтального на глубине примерно 336 м; 4 – шахтные стволы; 5 – главный угольный пласт; 6 – разработка открытым способом; 7 – геологические формации; 8 – сланец и песчаник

Для использования шахты в качестве резервуара природного газа в ее нижнюю часть были пробурены две скважины, через которые было откачено около 400 тыс. м³ воды. Ключевым вопросом было обеспечение герметичности шахты при хранении газа.

С этой целью проводилась работа по герметизации шахтных стволов, детали которой для ствола № 3 показаны на рис. 2.20. Аналогичные решения были приняты для других стволов.

Затем были произведены испытания эффективности хранения метана в шахте. В ней размещался объем газа 21,2 млн. м³ при давлении 1,4 МПа. Двухмесячное наблюдение показало относительно постоянное давление газа и уровень воды. После 18 месяцев испытаний компания решила расширить эксперимент. В старые горные работы были пробурены 17 скважин – 3 для откачки воды и наблюдений, остальные для закачки и откачки газа. После 1963 г. в шахте содержалось 57 млн. м³ природного газа при давлении 1,72 МПа. Годовое получение метана составляло 4 млн. м³.

При гидростатическом градиенте горного давления 9,73 кПа на метр для таких сравнительно мелких шахт, как Лейден, с глубиной разрабатываемого горизонта 245 м общее значение давления составляет 2,4 МПа. Максимальное давление хранения газа обычно не превышает 65-70 процентов этого значения, т.е. 1,55...1,67 МПа, что позволяет создать емкость хранения примерно в 16 раз больше имеющегося пространства (не считая дополнительного объема, создаваемого адсорбирующей способностью угля, открытого для газа).

В настоящее время в шахте содержится 85 млн. м³ газа с максимальной рабочей (т.е. извлекаемой) емкостью 62,3 млн. м³. Шахта обеспечивает 20% зимних пиковых потребностей Денвера в газе и стабилизирует цены на газ в этот период.

Годовые расходы компании на содержание комплекса

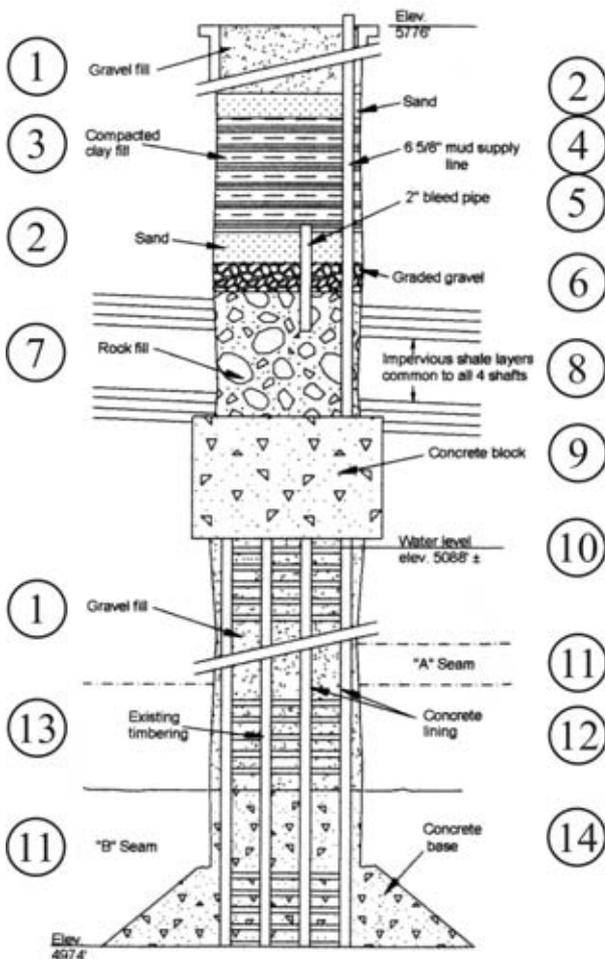


Рис. 2.20. Схема герметизации шахтного ствола

1 – гравий; 2 – песок; 3 - уплотненная глина; 4 – трубопровод подачи шлама диаметром 17 мм; 5 – отводная труба диаметром 5 см; 6 – сортированный гравий; 7 – породное заполнение; 8 - водонепроницаемые слои сланца (общие для 4 стволов); 9 - бетонная перемычка; 10 – уровень воды; 11 – угольный пласт; 12 - бетонная крепь; 13 - существующая деревянная крепь; 14 - бетонное основание

хранения составляют 800 тыс. долларов в год, но позволяют в тот же период сэкономить 14 млн. долларов

за счет отказа от покупки газа в моменты пиковых цен.

Резервуары природного газа в отработанных угольных шахтах имеются также в Бельгии. Шахты Андерлюс (Anderlues) и Пеоннес (Peonnes) добывали уголь между 1857 г. и 1969 г., небольшие горные работы велись перед 1857 г. Эксплуатационные горизонты располагались на глубине 660 и 1100 м. После закрытия шахт были установлены устройства улавливания и приема дренирующего метана. С 1980 г. шахты использовались для хранения природного газа и содержали более 283 млн. м³ газа, откачиваемого в пиковые периоды.

На шахте Андерлюс были герметизированы 10 стволов, на шахте Пеоннес – 19. Контроль заполнения шахт метаном, вытесняющим воздух, выполнялся приборами, установленными в нескольких стволах. Из шахт метан направлялся в газопроводы для продажи. Максимальное годовое получе-

ние газа на каждой шахте составило около 18 млн. м³.

В результате развития горных работ в регионе описываемые шахты были относительно сухими и требовали только небольшого обезвоживания в ходе их эксплуатации. Добыча угля производилась на нескольких горизонтах в обеих шахтах, начиная с глубины 98 м от поверхности и простираясь до 1100 м. Из-за малой глубины разработок максимальное давление хранимого газа не превышало 276 кПа. С этим давлением газ инъецировался в шахты.

Адсорбционная способность оставшихся неразработанными угольных пластов увеличивала почти до десятикратного фактический объем хранения.

Работы по хранению природного газа в шахтах Бельгии были остановлены в 2000 г. из-за необходимости установки дополнительного дорогостоящего оборудования в стволах. По ориентировочным оценкам в угле шахт в настоящее время адсорбировано 160 млн. м³ газа, в свободном состоянии находится 20 млн. м³.

Опыт хранения природного газа в закрытых угольных шахтах демонстрирует техническую возможность их использования в качестве резервуаров при следующих наиболее приемлемых условиях:

- глубина более 300 м;
- неповрежденная толща горных пород. Это условие для неглубоких шахт обеспечивается лучше при короткозабойных системах выемки угля с оставлением целиков (распространенных в Америке), чем при длиннозабойных со сплошной выемкой (применяемых в Европе);
- шахта не работает последние 50 лет;
- шахта имеет детальную документацию проводившихся горных работ;
- имеется достаточно непроницаемая перекрывающая толща пород;
- шахта имеет немного связей с поверхностью (стволов, скважин и др.).

2.2 Стратегический нефтяной резерв США

Стратегический нефтяной резерв США создан с целью уменьшения зависимости от нефтедобывающих стран, при прекращении ими подачи нефти на срок до 90 дней. США используют 19 млн. баррелей в сутки и более половины этого топлива идет от импорта.

Эксплуатация резерва началась в 1975 г. и с этого времени США использовали эту нефть дважды – первый раз в 1991 г. во время первой войны в Персидском заливе – 17 миллионов баррелей, затем в 2000 г. – 30 млн. баррелей. Поддержание резерва стоит правительству 21 млн. долларов в год, его обслуживает 1150 человек.

Стратегический запас сырой нефти хранится в полостях, созданных в мощном соляном месторождении, которое залегает под большей частью побережья Мексиканского залива в штатах Техас и Луизиана. Расположение здесь хранилища было выбрано для того, чтобы обеспечить его гибкую и надежную связь с существующими транспортными путями. Отсюда нефть через магистральные трубопроводы и трубопроводы штатов может транспортироваться к перерабатывающим предприятиям или к морским танкерам (рис. 2.21 цв. вкл.).

Каждая соляная полость позволяет разместить от 6 до 35 млн. баррелей (1 баррель = 159 л). Типичная полость имеет цилиндрическую форму с диаметром более 60 м и высотой 610 м (рис. 2.22 цв. вкл.). Общее количество таких полостей около 50, а их общая емкость около 750 млн. баррелей (рис. 2.23 цв. вкл.). Возможная производительность откачки нефти из хранилища составляет 4,4 млн. баррелей в день в течение 90 дней. После этого отдающая способность запаса уменьшается.

Вид с воздуха на часть нефтехранилища показана на рис. 2.24.



Рис. 2.24. Вид с воздуха на нефтехранилище

Соляные полости были созданы растворением участков соляного пласта технология работ описана ранее и аналогична хранилищам природного газа. Для размещения каждого барреля нефти требуется 7 баррелей воды, создающей полость нужного объема.

Хранение нефти в соляных полостях обходится в 10 раз дешевле, чем в емкостях на поверхности и в 20 раз дешевле, чем в других горных породах. Такое хранение также наиболее безопасно для окружающей среды. При глубине расположения полостей от 600 до 1200 м горное давление заставляет пластичную соль закрывать возникающие трещины и разрывы.

При расстоянии между кровлей полости и ее дном около 600 м разница естественных температур заставляет нефть

циркулировать, делая ее консистенцию постоянной.

Поскольку нефть легче воды и всплывает в ней, это свойство используется для откачки нефти из полостей, куда закачивается вода, вытесняя нефть к кровле полости и к приемным трубопроводам.

Стратегический резерв состоит из четырех основных хранилищ – Биг Хилл (Big Hill), Брайан Маунд (Bryan Mound), Вест Хэкберри (West Hackbarry) и Бэйо Хоктоу (Bayou Choctaw), расположенных вдоль побережья залива.

Каждое хранилище состоит из нескольких полостей и вмещает:

- Биг Хилл (Big Hill), штат Техас – 165 млн. баррелей в 14 полостях;
- Брайан Маунд (Bryan Mound), штат Техас – 230 млн. баррелей, 20 полостей;
- Вест Хэкберри (West Hackbarry), штат Луизиана – 225 млн. баррелей, 22 полости;
- Бэйо Хоктоу (Bayou Choctaw), штат Луизиана – 80 млн. баррелей, 6 полостей.

2.3 Подземные угольные склады

В странах Северной Европы часто случаются дни с температурой ниже -30°C , когда загрузка угля из наземных складов в тепловые электростанции становится весьма трудной. Расположение таких складов на поверхности земли приводит также к высокой запыленности воздуха и шуму, что особенно важно для плотно застроенных городских территорий. Подобные проблемы возникают при хранении других сыпучих материалов.

В связи с этим, одной из голландских компаний предложена конструкция закрытых силосных складов, позволяющая обеспечить емкость силоса от 750 м^3 до 100 тыс. м^3 . Силос может изготавливаться из различных типов конструкций, например, при строительстве на поверхности из

стальной структуры с внутренней деревянной обшивкой стен. При подземном строительстве применяется бетон.

Хранимый продукт поступает через центр верха силоса и спускается через телескопическую горловину. Шнековым конвейером, подвешенным к поворотной мостовой структуре, продукт укладывается горизонтальными слоями. Этим же механизмом производится разгрузка бункера, причем погрузочно-разгрузочные работы ведутся автоматически (рис. 2.25 цв. вкл., 2.26 цв. вкл.).

Описанный тип бункеров силосного типа был применен на электростанции Салмасаари (Salmasaari), Хельсинки, Финляндия (рис. 2.27 цв. вкл.). Электростанция расположена на морском побережье в нескольких километрах от центра финской столицы. Топливом станции является уголь, который до 2003 г. доставлялся к ней от разгрузочного терминала морского порта ленточным конвейером производительностью 2000 т/час. Конвейер установлен в туннеле длиной 700 м и сечением 25 м². Доставленный к электростанции уголь складировался на поверхности, где бульдозерами грузился на конвейер, поднимающий его к бункерам станции.

Чтобы избежать недостатков наземного хранения и транспортировки угля, построен комплекс из четырех подземных силосных бункеров, каждый емкостью 50 тыс. м³. Общая емкость бункеров обеспечит работу электростанции в течение 6 месяцев. В случае пожара в силос вводится азот. Каждый бункер имеет круглое сечение диаметром 40 м. Высота бункеров – 65 м. Существующий конвейерный туннель переоборудован для подачи в них угля. Построен новый конвейерный туннель шириной 6,7 м, высотой 7 м и сечением 44 м² для транспортировки угля из-под бункеров к электростанции.

Всего проект включает проходку около 3,5 км туннелей с 40 различными размерами сечений (рис. 2.28 цв. вкл.). Общий объем извлеченных гранита и гнейса составляет 550

тыс. м³. Эти породы после дробления используются для местной строительной индустрии.

Силосные бункера сооружались отдельными фазами с двух вспомогательных туннелей, пройденных один под другим рядом с бункерами. Нижняя часть каждого силоса проходила с конвейерного туннеля. Отбитая порода грузилась в 30-тонные самосвалы.

Горные работы производились таким образом, чтобы не повредить существующие подземные сооружения, включающие разного рода туннели, например, подачи охлажденной воды. Одновременно с бункерами построена новая подземная рефрижераторная установка для охлаждения находящегося поблизости административного корпуса.

Проходческие работы велись буровзрывным способом в три семичасовые смены, обеспечивая суточную выдачу породы 2,5 тыс. м³. Кроме туннелей таким же способом пройдено около 600 м вертикальных шахт, одна из них – глубиной 80 м и диаметром 1,5 м пробурена снизу вверх. Кровля закреплена монолитным железобетоном с гибкой арматурой, состоящей из прутьев длиной 6 м и диаметром 25 мм, установленной по квадратной сетке размером 1,8 м. В стенах по сетке 2,5 м установлены прутья длиной 5 м. Слой набрызгбетона толщиной 100 мм применен для кровли, 50 мм – для стен.

Для получения образцов уложенного бетона и проверки его качества осуществлялось контрольное бурение по бетонному монолиту.

В качестве временной крепи применялись анкерные болты. В зонах трещиноватых пород проводилась их предварительная цементация с бурением скважин по периферии зоны отбойки.

2.4 Гидроаккумулирующие электростанции

Электрическая энергия не может быть сохранена на-

прямую. Ее хранение может быть достигнуто преобразованием в какие-либо другие – «хранимые» формы. Из них энергия при необходимости конвертируется в электрическую. Обычно электроэнергия преобразуется в хранимую форму в периоды снижения потребляемых нагрузок, так называемые, внепиковые. Поскольку стоимость энергии в такие периоды падает, ее сохранение имеет экономический смысл с тем, чтобы в пиковые периоды потребления продавать энергию по более высоким ценам. Эта разница цен является источником расходов на строительство и эксплуатацию комплексов хранения.

Далее описаны наиболее широко используемые подземные способы хранения электроэнергии – гидроаккумулирующие (насосные) и пневмоаккумулирующие электрические системы.

Один из простейших универсальных способов хранения энергии – подъем веса. Выполненная работа при этом сохраняется, как потенциальная энергия, которая может быть освобождена при падении веса, поскольку гравитационное поле Земли служит эффективным средством хранения механической энергии.

Этот способ сохранения и использования энергии реализован в гидроаккумулирующих (насосных) электростанциях, комплексы которых включают в себя два больших резервуара, расположенные на разных уровнях. Во время пиковых потребностей в электроэнергии вода из верхнего резервуара пропускается по туннелям или шахтам высокого давления, проходит через турбины и попадает в нижний резервуар. Турбины, вращаясь, вырабатывают электроэнергию, которая направляется потребителям. Таким образом, сохраняемая за плотиной верхнего резервуара потенциальная энергия воды превращается в кинетическую, а затем в электрическую. Как и в обычной гидроэлектростанции, вырабатываемая энергия может быть увеличена либо массой падающей воды, либо ее скоростью, которая зависит от раз-

ницы высот резервуара. Поэтому считается необходимым, чтобы эта разница составляла не менее 100 м.

Когда потребность в электроэнергии снижается, турбины работают как насосы, и вода из нижнего резервуара возвращается в верхний (рис. 2.29 цв. вкл.). Такая перекачка воды требует большего расхода энергии, чем вырабатывается ею при работе турбин. Однако, нельзя сказать, что работа таких гидроэлектростанций экономически нецелесообразна. Она может быть особенно полезна при использовании альтернативных источников энергии, таких, как ветер или солнце. Некоторые регионы могут производить больше такой энергии, чем требуется и этот излишек может быть направлен на перекачку воды. Когда же нет солнца или ветра, вода из верхнего резервуара направляется к турбинам для выработки электроэнергии.

Комплекс гидроаккумулирующей электростанции включает в себя большое количество подземных полостей разного размера и протяженных туннелей. Примером такого комплекса является построенная в 1984 г. в Северном Уэльсе, Великобритания станция Динорвиг (Dinorwig), в которой ночью при падении уровня потребления энергии вода закачивается в верхний резервуар из нижнего. При внезапных повышениях потребности в энергии вода направляется вниз к турбинам, которые приводят в действие мощные генераторы. Разница в высотах между верхним и нижним резервуарами составляет более 600 м. В качестве резервуаров используются существующие озера, что позволило уменьшить затраты на строительство комплекса. Каждый из 6 генераторов обеспечивает мощность 288 мегаватт с напряжением электроэнергии 18000 вольт, которое трансформируется в 4000 вольт. Принципиальная схема работы генератора показана на рис. 2.30 (цв. вкл.).

Далее даны основные параметры подземной структуры комплекса:

- рабочий объем резервуара – 7 млн. м³;

- высота верхнего резервуара над уровнем моря – 636 м;

- высота нижнего резервуара над уровнем моря – 4,5 м;
- размеры турбинного зала 23,5x51,3x179 м;
- размер трансформаторного зала 17x23,5x161 м;
- длина туннеля низкого давления – 1695 м;
- диаметр туннеля низкого давления – 10,5 м;
- глубина вертикальной шахты – 557 м;
- длина туннеля высокого давления – 700 м;
- длина сбросного туннеля – 470 м;
- диаметр сбросных туннелей – 8,25 м;
- количество сбросных туннелей – 3.

На рис. 2.31 (цв. вкл.) показана общая схема расположения полостей и туннелей гидростанции Динорвиг, на рис. 2.32 – конфигурация и размеры основных подземных структур этой станции, а на рис. 2.33 (цв. вкл.) – разрез по туннелям и полостям.

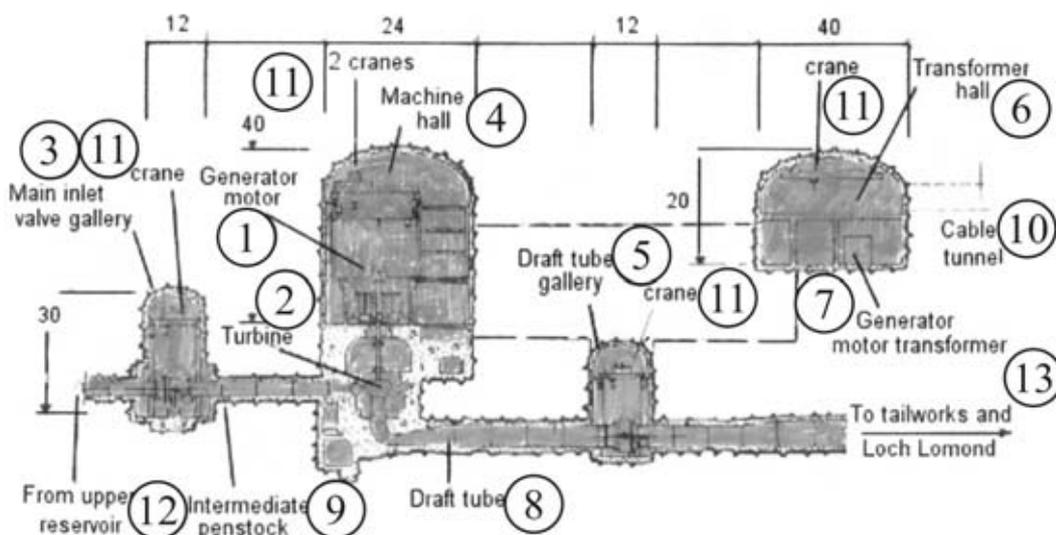


Рис. 2.32. Комплекс главных подземных полостей гидроаккумулирующей электростанции (Динорвиг)

1 – мотор-генератор; 2 – турбина; 3 – главный вход в вентильную камеру; 4 – машинный зал; 5 – вентильная камера; 6 – трансформаторный зал; 7 – трансформатор; 8 – сбросная труба; 9 – промежуточный турбинный водовод; 10 – кабельный туннель; 11 – краны; 12 – из верхнего резервуара; 13 – в нижний резервуар

На рис. 2.34 (цв. вкл.) основные объекты станции Динорвиг показаны в увязке с окружающим ландшафтом. Верхний слой горных пород условно удален так, чтобы показать расположение шахт и туннелей.

На рис. 2.35 (цв. вкл.) показаны верхний и нижний резервуары станции Динорвиг. Основные машинные залы изображены на рис. 2.36 (цв. вкл.) и 2.37 (цв. вкл.).

На рис. 2.38 (цв. вкл.) показан вид с воздуха электростанции Круонис (Kruonis), Литва, построенной в 1992-98 гг.

В качестве нижнего резервуара может использоваться море (рис. 2.39 цв. вкл.) - станция Окинава (Okinawa), Япония, или искусственные подземные полости (рис. 2.40 цв. вкл.), тогда, как море используется в качестве верхнего резервуара.

Подземные гидроаккумулирующие станции широко распространены в Норвегии, что делает необходимым, с одной стороны, увеличение инвестиций в эту отрасль энергетики, а с другой – разработка таких проектных решений, которые бы уменьшили объем горных работ, расход строительных материалов и затраты на обеспечение устойчивости вмещающих пород. Эти условия обеспечиваются, в частности, целесообразной ориентацией, уменьшением ширины и выбором формы сечения полостей, в которых устанавливаются генераторы, турбина, вентили и трансформаторы.

Первая подземная гидроэлектростанция в Норвегии была построена в 1919-23 гг. В 1970-80 гг. около 90 станций общей мощностью 6350 MW были сданы в эксплуатацию. 60 из них были построены под землей. В такой стране, как Норвегия, с крутыми горными склонами, ограничивающими долины, с опасностью камнепадов, оползней, снежных лавин подземные структуры являются более безопасными, чем расположенные на поверхности. За период с 1950 гг. конструктивные решения норвежских подземных электростанций претерпели значительные изменения, которые мо-

могут быть разделены на 4 этапа (рис. 2.41):

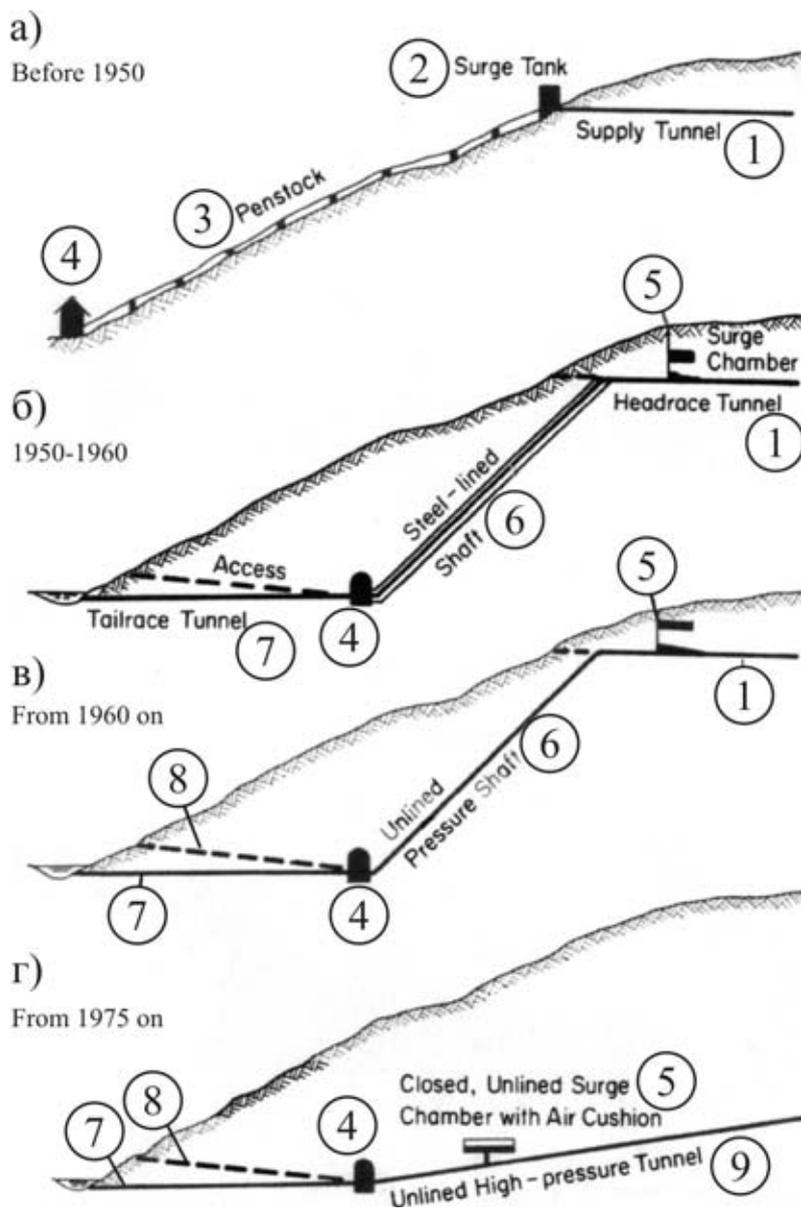


Рис. 2.41. Этапы совершенствования структур подземных гидроэлектростанций

а – до 1950 г.; б – 1950-1960 гг.; в – с 1960 г.; г – с 1975 г.; 1 – головной туннель; 2 – амортизирующая емкость; 3 – стальные трубы; 4 – электростанция; 5 – амортизирующая камера; 6 – наклонная шахта; 7 – хвостовой туннель; 8 – подводящий туннель; 9 – наклонный туннель

а) до 1950 г. вода из верхнего резервуара подается к турбинам по стальным трубам. На поверхности сооружаются амортизирующие емкости, сглаживающие кратковременные колебания потока в подводящем головном туннеле;

б) между 1950 и 1960 гг. вода к турбинам подается по

наклонным шахтам, закрепленным металлической крепью. В качестве амортизирующей емкости используется открытая подземная камера, соединенная с поверхностью;

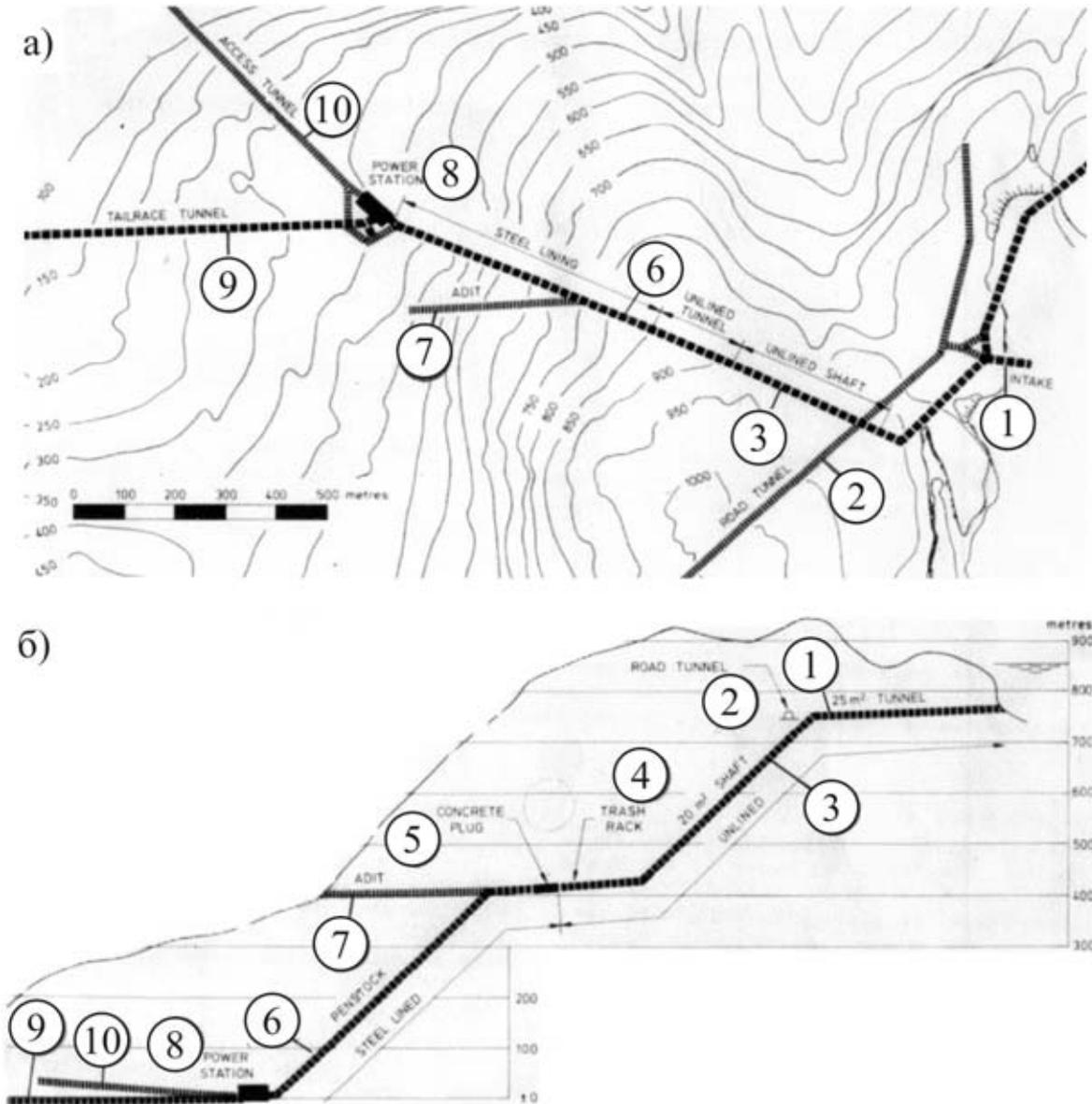


Рис. 2.43. Расположение комплекса туннелей гидроэлектростанции Маунанджер

а – план; б – разрез по основным туннелям; 1 – головной туннель; 2 – автомобильный туннель; 3 – наклонная шахта (закрепленная только анкерными болтами и набрызг-бетоном); 4 – заградительная решетка; 5 – бетонная перемычка; 6 – наклонная подающая шахта (закрепленная стальной крепью); 7 – штольня; 8 – гидроэлектростанция; 9 – хвостовой туннель; 10 – подводящий туннель

в) с 1960 гг. вода к турбинам подается по напорным наклонным незакрепленным шахтам (применяется только анкерная крепь и в слабых зонах - набрызгбетон). В качестве амортизирующей емкости используется открытая подземная камера, соединенная с поверхностью;

г) с 1975 г. вода к турбинам подается по наклонным высоконапорным незакрепленным туннелям. В подземной амортизирующей полости буферный эффект сглаживания неравномерности потока достигается воздушной подушкой.

Примером решения 1-го этапа служит электростанция Барги (Bargi), Италия (рис. 2.42 цв. вкл.). Технологические комплексы подземных выработок современных норвежских электростанций Мауранджер (Mauranger) и Квиллдал (Kvilldal) показаны на рис. 2.43, 2.44.

На рис. 2.45 (цв. вкл.), 2.46 (цв. вкл.) показаны соответственно типичные для норвежских гидроаккумулирующих электростанций изометрическая схема и разрез по подземному комплексу. Для снижения затрат на строительство принимаются решения по более компактному его расположению, в частности упрощению маршрута подачи воды по сравнению с поверхностным расположением станции. Значительная экономия средств достигается также расположением подземного комплекса в таких горно-геологических условиях, которые не требуют применения мощной крепи. Важное значение имеет ориентация подземных объектов в пространстве, учитывающая неоднородность структуры горных пород. В соответствии с характеристиками последних выбираются форма сечения и вид крепи выработок – например плоская или арочная кровля, прямые или изогнутые стены, симметричная или ассиметричная форма сечения, монолитная железобетонная или анкерная крепь. На устойчивость полостей влияет их взаимное расположение: недостаточное расстояние между ними приводит к концентрации горного давления на разделяющем целике, к его расстрескиванию и раздавливанию. Стоимость сооружения под-

земного комплекса электростанции зависит также от размеров полостей, особенно самых больших, предназначенных для главных машинных залов. Их размеры, кроме стоимости, определяют технологию и последовательность горных работ, но, в свою очередь, диктуются принципами работы, габаритами и расстановкой оборудования.

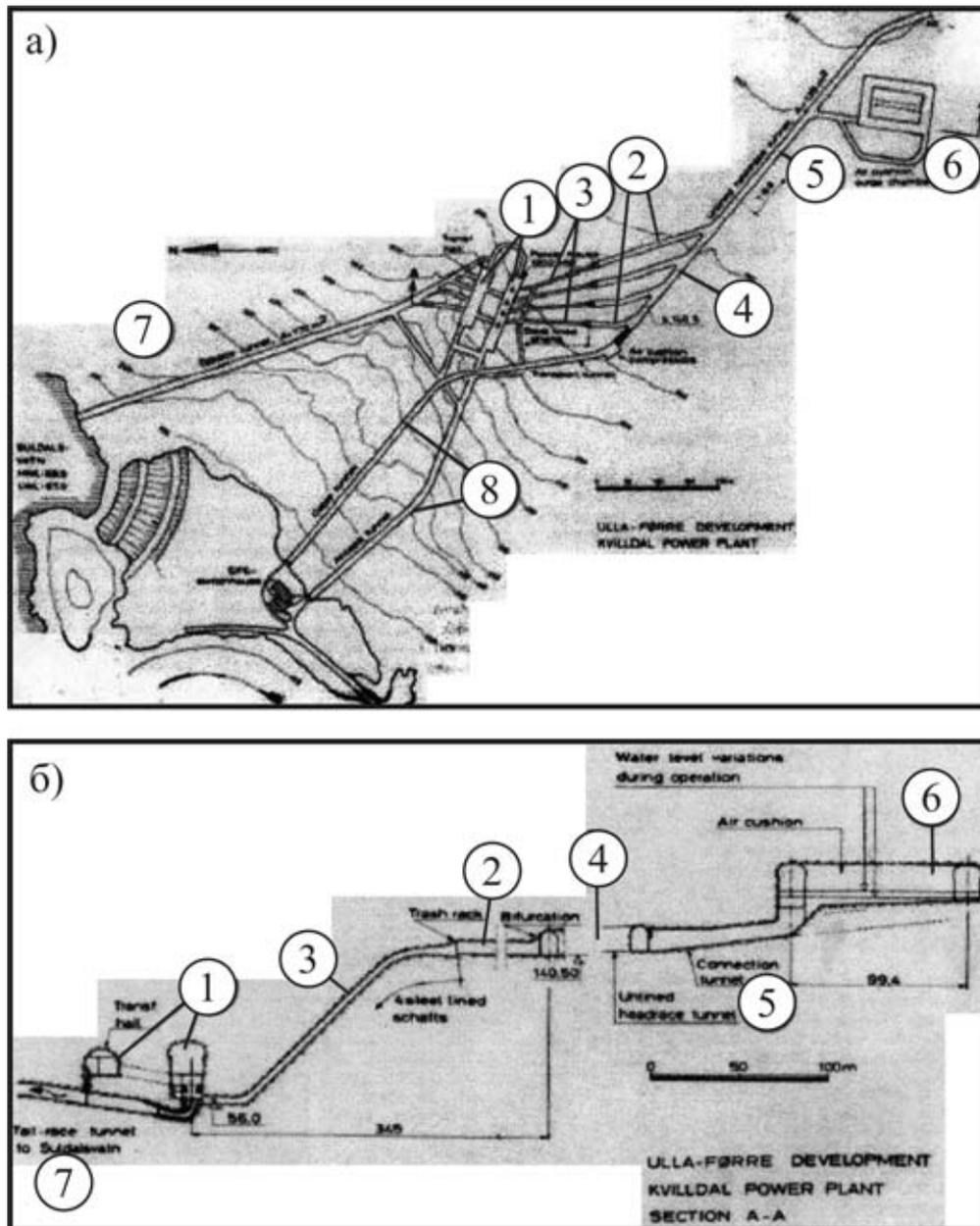


Рис. 2.44. Подземный комплекс гидроэлектростанции Квиллдал
 а – план; б – разрез по основным туннелям и полостям; 1 – машинные залы; 2 – горизонтальные туннели; 3 – наклонные шахты подачи воды; 4 – распределительный туннель; 5 – головной туннель; 6 – амортизирующая камера; 7 – хвостовой туннель; 8 – подводящие туннели

Так, в станции Абьора (Abjora), Норвегия (рис. 2.47), построенной в 1947-51 гг., применены три горизонтальных турбины, установленные в одном зале с трансформаторами. Тот же принцип использован в станции Хьяртдола (Hjartdola), Норвегия (рис. 2.48), но здесь установлены турбины с вертикальными осями, что снизило объем строительных работ на 20%.

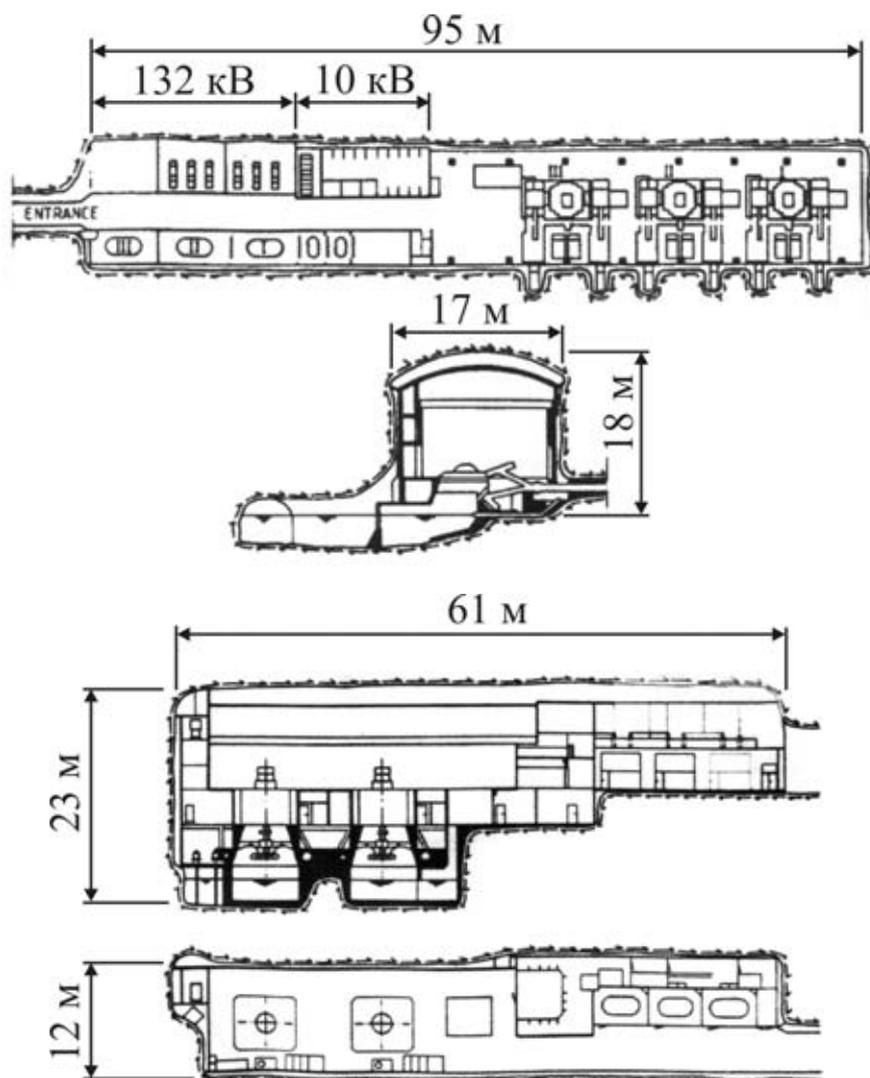


Рис. 2.47.
Установка
горизонтальных
турбин в
машинном зале
электростанции
Абьора

Рис. 2.48. Установка вертикальных турбин в машинном зале электростанции Хьягтдола

В обеих станциях турбины установлены в линию, что уменьшило ширину машинных залов. Эта же цель может быть достигнута расположением генераторов и трансформаторов в двух параллельных камерах вместо одной, что

повышает их устойчивость и снижает опасность пожара. Такое решение было принято на электростанции Брокке (Brokke) (рис. 2.49). Общий объем горных работ, однако, при таком варианте увеличивается, как за счет собственно полостей, где установлено оборудование, так и в связи с увеличением количества подводящих и соединительных туннелей.

На рис. 2.50, 2.51 (цв. вкл.) показано строительство главных машинных залов подземных электростанций Эртан (Ertan), Китай и Нью-Скджерка (New-Skjerka), Норвегия. На первой из них машинный зал имеет ширину 26 м, высоту 65 м и длину 280 м, трансформаторный зал – размеры 18x25x215 м.

Амортизирующая камера имеет размеры 20x65x200 м, 6 подающих туннелей пройдены диаметром по 9 м.

На станции Нью-Скджерка машинный зал имеет объем 25 тыс. м³.

Кроме основных машинных залов, важным компонентом подземных гидроаккумулирующих станций являются, как уже говорилось, специальные сооружения, сглаживающие кратковременные колебания потока в головном туннеле, подающем воду к турбинам из верхнего резервуара. До 1975 г. для этой цели применялись поверхностные емкости и шахты, связанные с поверхностью. В последующие годы используется так называемая амортизирующая камера, в которой буферный эффект создается воздушной подушкой (рис. 2.52). Ее давление определяется высотной отметкой питающего резервуара. Под воздушной подушкой располагается слой воды. Первоначальное заполнение камеры воздухом производится компрессором, который также компенсирует потери воздуха при эксплуатации.

На рис. 2.53 показаны план и разрез амортизирующей камеры. Обычный объем такой камеры не превышает 20 тыс. м³, кроме камеры для гидроэлектростанции Квиллдал, которая имеет объем 120 тыс. м³ (рис. 2.54). Избыточное давление воздуха составляет, как правило, 4

быточное давление воздуха составляет, как правило, 4 МПа, наибольшее достигало 7,7 МПа.

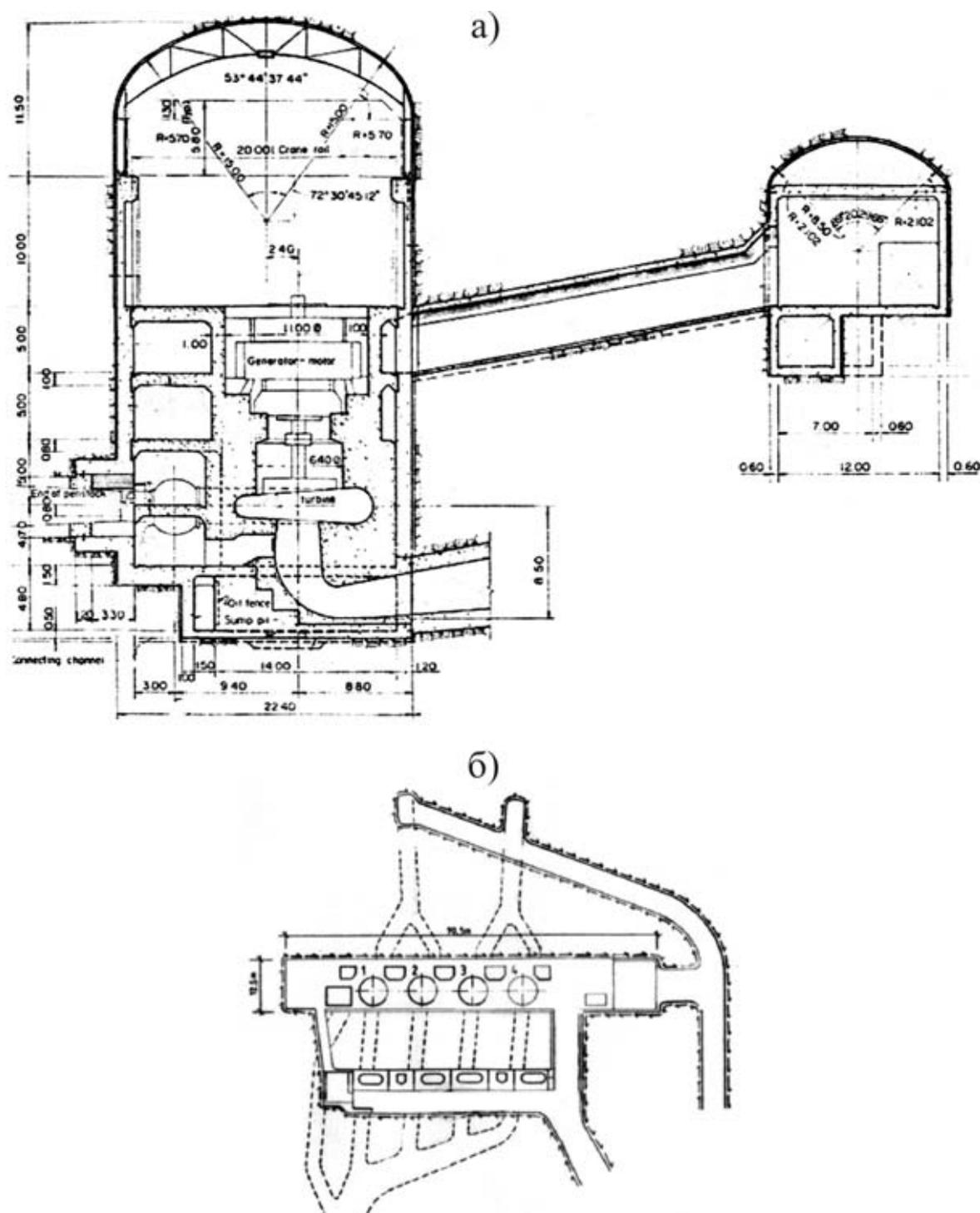


Рис. 2.49. Взаимное расположение двух главных залов электростанции Брокке
а – разрез; б - план



Рис. 2.50. Строительство главного машинного зала подземной электростанции Эртан

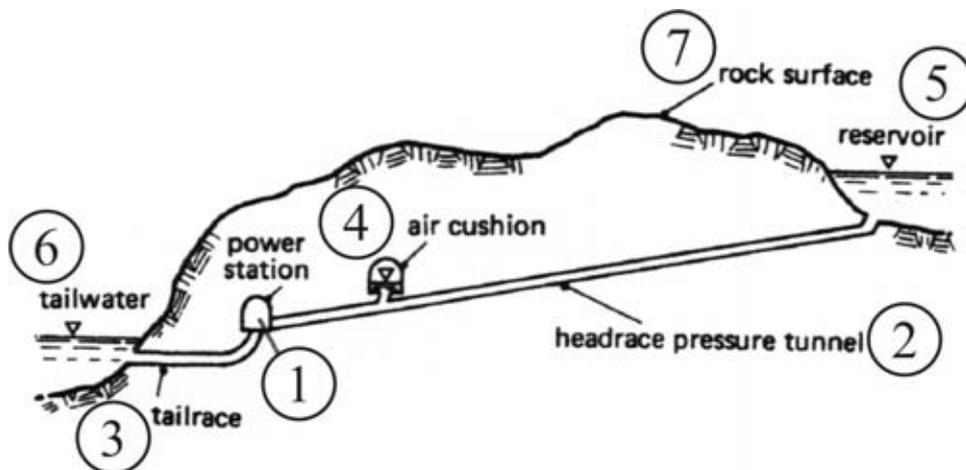


Рис. 2.52. Привязка амортизирующей камеры к комплексу туннелей и полостей гидроэлектростанции

1 – машинный зал; 2 – головной туннель; 3 – хвостовой туннель; 4 – амортизирующая камера; 5 – верхний резервуар; 6 – нижний резервуар; 7 – поверхность горы

Подземный комплекс гидроэлектростанции обычно располагается в крепких породах-гранитах и гнейсах и сооружается с помощью буровзрывных работ. Как правило, подземные полости крепятся анкерными болтами и набрыз-

гбетоном. Так, в электростанции Динорвиг применялись канатные анкера с минимальной длиной 8 м, анкерные болты длиной 3,7 м, удерживающие металлическую сетку, усиленную набрызгбетоном.

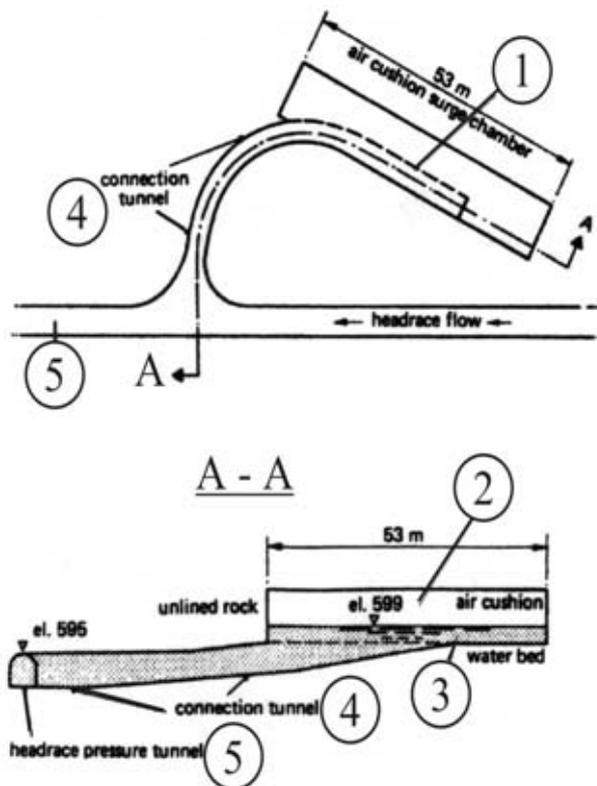
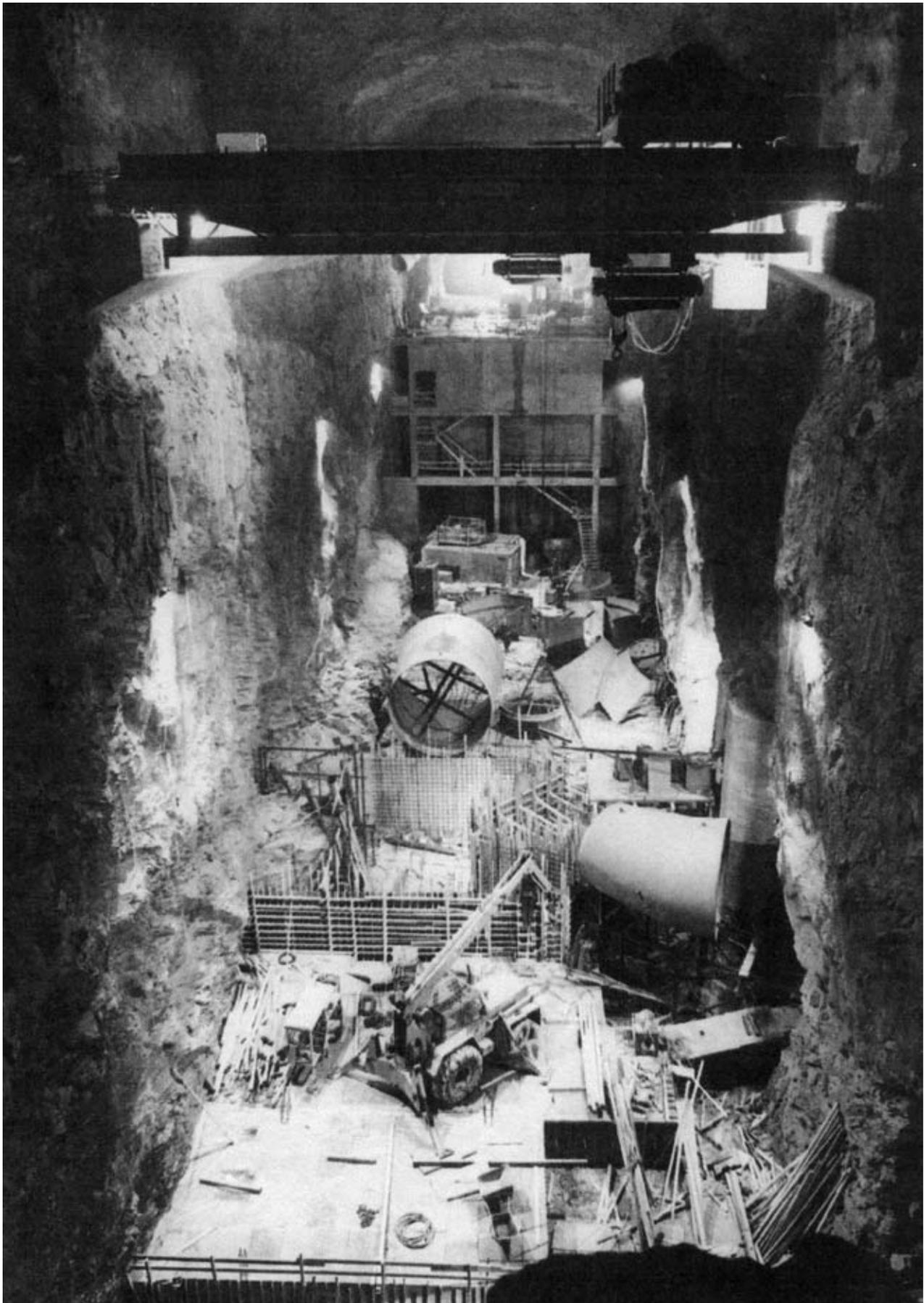


Рис. 2.53. План и разрез амортизирующей камеры
 1 – амортизирующая камера; 2 – воздушная подушка; 3 – слой воды; 4 – соединительный туннель; 5 – головной напорный туннель станции

2.5 Пневмоаккумулирующие электростанции

Концепция использования энергии сжатого воздуха для производства электроэнергии известна уже 30 лет. Однако, только две станции работают сейчас по этой схеме – Хантдорф (Hantdorf) в Германии 23 года и Макинтош (McIntosh) в штате Алабама, США – 11 лет.

Наибольшая в мире станция строится в г. Нортон (Norton), штат Огайо, США. Концепция предполагает применение систем хранения сжатого воздуха, позволяющих в период пониженного спроса на энергию, например, ночью или



**Рис .2.54. Строительство амортизирующей камеры
электростанции Квиллдал**

в выходные дни, нагнетать его в подземные полости (рис. 2.55 цв. вкл.). Излишки энергии от источников, таких, как тепловые, атомные, ветряные или гидроэлектростанции направляются в сети, приводящие в действие воздушные компрессоры. Сжатый воздух закачивается в подземное хранилище, например, соляную полость, и хранится там для последующего использования. Когда наступает потребность в электричестве, сжатый воздух из полости возвращается на поверхность и направляется к турбине, приводящей в движение генератор. Излишек тепла, полученный при расширении сжатого воздуха поступает к рекуператору-теплообменнику, где тепло утилизируется (рис. 2.56 цв. вкл.).

Сжатый воздух может аккумулироваться в таких же подземных структурах, как и другие газы, - в соляных куполах, водоносных пластах и полостях внутри массива горных пород. Формирование полости в соляном слое показано на рис. 2.57 (цв. вкл.).

Для хранения сжатого воздуха применяется два типа подземных полостей – с постоянным объемом и постоянным давлением. В полости постоянного объема по мере извлечения сжатого воздуха его давление падает, в полости постоянного давления вода, подаваемая из поверхностного резервуара заменяет извлекаемый сжатый воздух, позволяя таким образом поддерживать его давление в полости.

Далее приводится описание работающих и строящейся электростанций, использующих энергию сжатого воздуха, хранящегося в подземных полостях.

Станция Хантдорф (рис. 2.58 цв. вкл.), расположенная в Северной Германии, была сдана в эксплуатацию в 1978 г. и является первой в мире, работающей на сжатом воздухе. Ее мощность равна 290 MW. Сжатый воздух хранится в двух соляных полостях емкостью 140 тыс. м³ и 170 тыс. м³ (общий объем 310 тыс. м³) (рис. 2.59). Вершина полостей находится на глубине 650 м, дно – 800 м. Их максимальный

диаметр – 60 м. Рабочее давление сжатого воздуха в полости – 4300...7000 кПа.

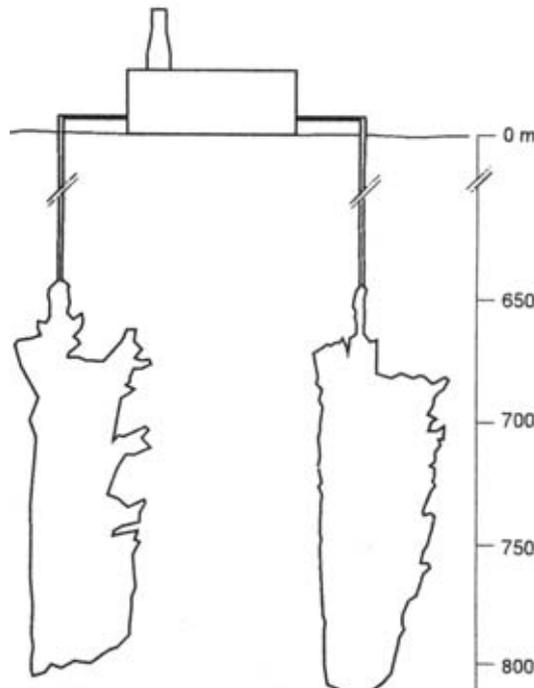


Рис. 2.59. Соляные полости станции Хантдорф (полости и здание станции выполнены в одном масштабе)

Объем воздуха, необходимый для нормальной работы станции, обеспечивается только одной полостью. Наличие двух полостей объясняется необходимостью создания резерва на период обслуживания или ремонта одной из них, а также улучшением режима работы оборудования станции при наличии двух полостей. Глубина расположения полостей была выбрана так, чтобы гарантировать максимально возможное давление воздуха 10 тыс. кПа.

В отличие от обычной технологии сооружения соляной полости, рассол из нее удалялся не вытеснением сжатым воздухом, нагнетаемым в полость, а откачкой погружным насосом. Такое решение объяснялось неадекватностью производительности компрессоров и пропускной способности трубопроводов полости.

Станция Макинтош является первой в США, работающей на энергии сжатого воздуха. Ее мощность составляет

110 MW, что позволяет обеспечить электроэнергией 11 тыс. домов в течение 26 часов. Станция начала работать в 1991 г.

Сжатый воздух хранится в соляной полости, имеющей диаметр около 70 м, вершину, расположенную на глубине 460 м, дно – на глубине 770 м и емкость примерно 1,2 млн. м³. При среднем давлении на уровне моря 101,4 кПа, воздух в полости при полной закачке хранится под давлением около 7600 кПа, при откачке – под давлением около 4500 кПа.

В настоящее время ведутся работы по проектированию и строительству крупной электростанции, работающей на сжатом воздухе в г. Нортон. Макет комплекса зданий и сооружений станции показан на рис. 2.60. Для хранения сжатого воздуха здесь будет использоваться старая известняковая шахта в отличие от станций Хантдорф и Макинтош, где сжатый воздух хранится в соляных полостях.

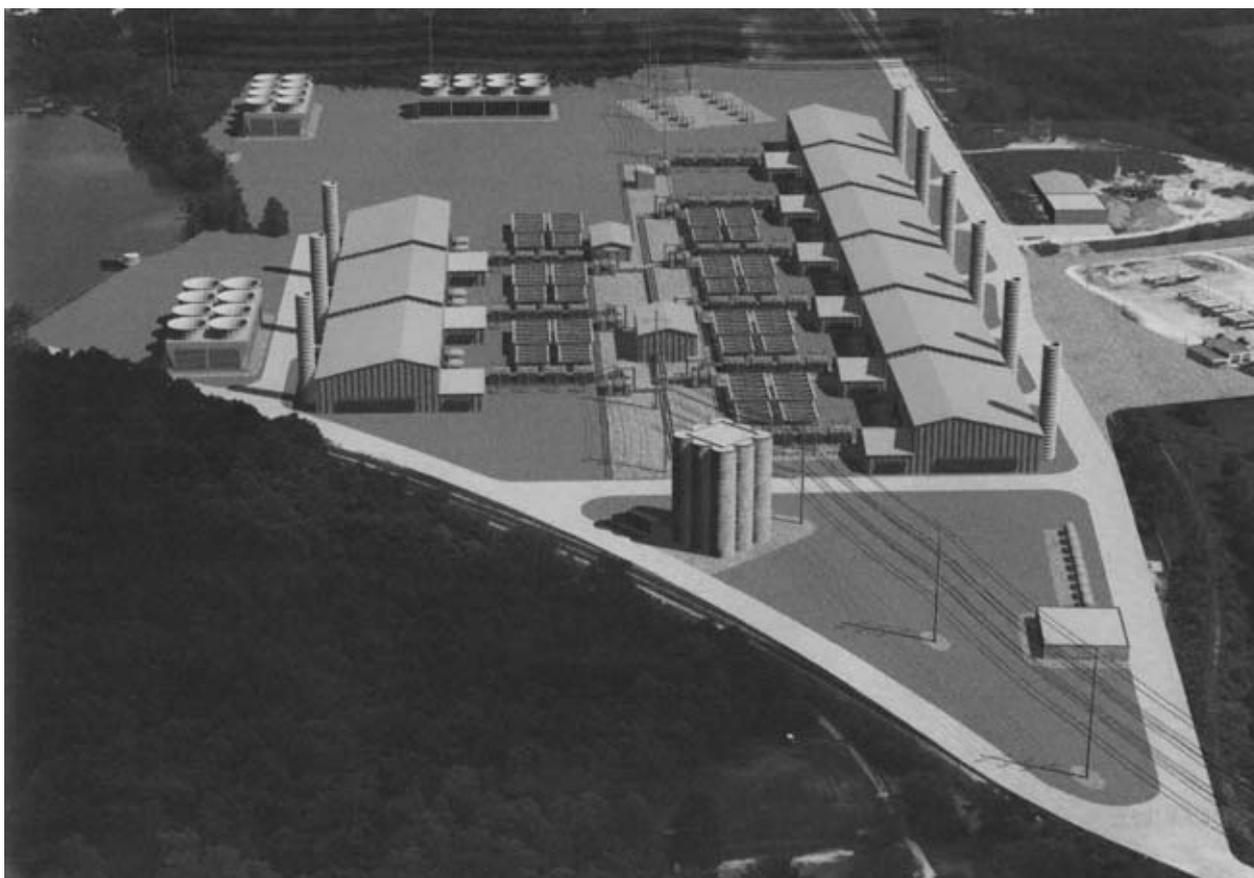


Рис. 2.60. Макет комплекса зданий и сооружений станции Нортон

Сжатый воздух будет нагнетаться в шахту промышленными компрессорами в периоды малой потребности в электричестве, например, ночью. Под давлением более 10 тыс. кПа воздух на глубине около 800 м будет наполнять подземную полость длиной более 2,4 км, шириной 1,6 км с высотой от 5 до 15 м, общей емкостью 10 млн. м³. Специфической особенностью шахты, сделавшей ее возможное использование для герметического хранения воздуха, является полная изоляция от других разработок известняка. Шахта вскрыта всего двумя вертикальными стволами, связывающими ее с поверхностью и оборудованными подъемными установками. Стволы будут использоваться для спуска-подъема людей, материалов и оборудования, а также для вентиляции. Стволы будут отделены от основного хранилища герметическими перемычками.

Подготовка бывшей известняковой шахты к хранению воздуха показана на рис. 2.61 (цв. вкл.).

В периоды пиковых потребностей сжатый воздух, нагретый впрыскиваемым сгораемым природным газом, будет поступать для выработки электроэнергии к турбинам и генераторам.

Окончательная производительность станции, которая будет строиться очередями, превысит 2700 MW, что достаточно для снабжения электричеством 675 тыс. домов. На каждые 2 MW энергии, затраченной в процессе выработки электроэнергии, станция будет давать 3 MW. Проект должен быть завершен в 2006 г.

2.6 Термальная энергия

Как отмечалось ранее, вопрос хранения и использования термальной энергии подробно рассматривался в книге авторов «Подземная инфраструктура городов», Донецк, Норд-Пресс, 2004 г. Поэтому далее приводятся только самые общие сведения о хранении термальной энергии в под-

земных структурах, позволяющие создать у читателя представление о возможности и целесообразности таких решений.

Исследования хранения и использования термальной энергии начались в 1970 г. с рассмотрения системы хранения тепла в водоносном слое АТЭС (Aquifer Thermal Energy System) (рис. 2.62 цв. вкл.). Эта система сохраняет тепловую энергию в подземном водоносном слое. Система использует два колодца (две группы колодцев), связанных гидравлически. Одна группа является холодной стороной, другая – теплой. Холод зимой передается в холодный колодец водой и сохраняется там в водоносном слое. Летом холодная вода откачивается для охлаждения потребителя. В теплый колодец нагретая вода закачивается летом и насыщает теплом водоносный слой окружающих пород. Зимой эта вода откачивается для отопления потребителя. Применение теплообменников (рис. 2.63 цв. вкл.) улучшает эффективность работы системы.

Преимуществами системы является отсутствие потерь воды.

Недостатком системы является необходимость наличия водоносного слоя с нужными свойствами в толще горных пород под обслуживаемым объектом.

Широкомасштабное применение АТЭС началось в 1980 г. главным образом в Китае и с 1984 г. – в Швеции. Холодная термальная энергия использовалась в промышленности для охлаждения, тогда как теплая – в жилых районах. Система уменьшила потребление топлива для нужд отопления или охлаждения на 80-90%.

Второй системой, используемой для хранения тепловой энергии, является трубопроводная система DTES (Duct Thermal Energy Storage), которая отличается от описанной выше АТЭС. В системе DTES бурятся скважины глубиной 50...200 м. В них размещаются теплообменники – обычно пластиковые трубы, в которых тепло переносится водой от

источника к потребителю. Летом нагретая вода направляется в скважину и оставляет тепло, нагревая слой горных пород, окружающих ее. Охлажденная вода поступает к потребителю в системы кондиционирования напрямую или через тепловой насос, улучшающий эффективность работы системы. Зимой накопившееся в подземном хранилище тепло нагревает теплоноситель в скважине, который поступает к системам отопления потребителя. В качестве теплоносителя применяется вода, хорошо работающая при температурах выше 0°C . Если температура ниже нуля, к воде добавляются антифризы.

Эффективность системы DTES зависит от многих факторов, таких, как температура почвы и функционирующей системы, термальные особенности грунтов и др.

Первое промышленное освоение DTES началось в Швеции. Система имела 120 скважин глубиной по 60 м и использовалась для хранения тепловой энергии при температуре 70°C и последующего обогрева местного университета. В настоящее время наибольшая DTES расположена в Форте Полк (Fort Polk), штат Луизиана, США, где пробурено 8000 скважин, снабжающих теплой и холодной термальной энергией местных жителей. DTES используется также для размораживания дорог в Японии, Швейцарии и США.

Принципиально иным примером хранения термальной энергии является подземное хранение снега, с использованием его холода в летнее время для охлаждения зданий. В последние годы в Швеции рассматривается вопрос хранения снега в полостях, ранее применявшихся для хранения нефти (рис. 2.64 цв. вкл.). Складирование в них снега предусматривается в зимнее время. Летом снег явится источником холода. В этих полостях возможно также хранение искусственного снега. Современные снежные пушки производят снег при температуре минус 2°C .

ГЛАВА 3. СКЛАДИРОВАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

3.1 Хранение радиоактивных отходов в США

Радиоактивные отходы подразделяются на три типа – низкого, среднего и высокого уровня радиоактивности.

Отходы низкого уровня состоят из облученного мусора, металлолома, использованной защитной одежды, поступающих от промышленности и госпиталей, применяющих радиоактивные приборы и препараты. Такие отходы имеют очень низкий уровень короткоживущей радиоактивности, который снижается до безопасного через несколько сот лет, не требуют специальной защиты при погрузке и транспортировке и могут быть захоронены под землей на малой глубине.

Отходы среднего уровня радиоактивности состоят преимущественно из реакторной воды, фильтрующей смолы, удаляющей радиоактивные частицы из различных химических осадков, металлических оболочек тепловыделяющих элементов. Этот уровень выше предыдущего, его источник смешивают с бетоном или битумом для затвердения и последующего захоронения в неглубоких подземных хранилищах.

Отходы высокого уровня состоят преимущественно из расщепляющихся продуктов и трансурановых элементов отработанного ядерного топлива, которые являются как бы «золотом» от «сгорания» урана. Высокий уровень радиоактивности имеют остатки переработанного атомного оружия. Отходы высокого уровня имеют более 95% общей радиоактивности, выделяемой при работе атомных электростанций и требуют захоронения в так называемых депозитариях глубокого расположения. Эти отходы весьма разогреты, высоко-радиоактивны, требуют дистанционного обращения с ними и надежной защиты. Базовое топливо ядерных электро-

станций содержит уран 235 и представляет собой пилули, заключенные в металлические стержни. До своего использования эти стержни имеют малый уровень радиоактивности и с ними можно обращаться без специальных мер предосторожности. Во время ядерной реакции атом урана расщепляется, выделяя два или три нейтрона и небольшое количество тепла. Затем выделенные нейтроны взаимодействуют с другими атомами, расщепляя их и вызывая цепную реакцию. При этом выделяется большое количество тепла, которое на ядерных электростанциях генерирует электрическую энергию. В ходе цепной реакции возникают изотопы нескольких более легких элементов, являющихся источником тепла и проникающей радиации в отходах высокого уровня. Эти изотопы в конце концов распадаются, образуя безопасные материалы. Однако, в период распада они излучают радиацию и этот период для некоторых из них составляет тысячелетия. Отходы высокого уровня радиации опасны для человечества и других форм жизни.

В настоящее время отсутствуют сооружения для постоянного захоронения таких отходов. Поскольку единственной возможностью их обеззараживания является естественный распад, требующий сотен и тысяч лет, отходы должны храниться таким образом, чтобы обеспечить защиту от них в течение этого времени.

Осознавая опасность радиоактивных отходов, в индустриально развитых странах мира, имеющих атомные электростанции, ведутся интенсивные работы по созданию подземных хранилищ для отходов высокого и среднего уровня радиоактивности. В США имеется сейчас около 47,5 тыс. т радиоактивных отходов (45 тыс. т от гражданских атомных станций и 2,5 тыс. т от военных реакторов). К 2040 г. эта страна произведет около 108 тыс. т отходов, которые должны быть размещены в таком месте, чтобы предотвратить угрозу здоровью человечества и минимизировать риск террористических атак с использованием этих отходов.

Для решения вопроса постоянного хранения радиоактивных отходов рассматривалось несколько возможностей:

- оставить отходы, там же где они производятся;
- захоронить отходы под дном океана;
- разместить отходы под землей на очень большой глубине в специально пробуренных скважинах;
- удалить отходы в космическое пространство;
- захоронить радиоактивные отходы в полярных льдах;
- разместить отходы на отдаленных необитаемых островах;
- закачать отходы под высоким давлением на большие глубины под дном океана.

Каждая из этих возможностей имеет серьезные недостатки.

Оставленные на месте отработанные материалы могут быть серьезной опасностью для населения и окружающей среды. Большинство существующих атомных электростанций расположено в населенных районах. При своей работе ядерные реакторы требуют большого количества воды, поэтому они соседствуют с реками, озерами и морским побережьем. Емкости, содержащие отходы, с течением времени будут изнашиваться, их состояние ухудшится, что приведет к просачиванию через них грунтовых вод и выносу радиоактивных веществ к ручьям и рекам, снабжающим водой населенные пункты.

При захоронении отходов под дном океана возникает вопрос о возможности их будущего подъема и использования. Чрезвычайно трудно также обеспечить при этом способе наблюдение и управление процессом хранения.

Расположение контейнеров с радиоактивными отходами на глубине около 10 км под землей, казалось бы, позволит изолировать эти материалы на время их распада до безопасного уровня радиоактивности. Однако, при этом совершенно неизвестно как отходы поведут себя при исключительно высоких температуре и давлении на таких глуби-

нах.

Запустить отходы в космическое пространство можно было бы, послав их на околоземную орбиту или Луну. Однако, возможное рассеяние радиоактивных материалов при неудачном запуске космической ракеты делает этот вариант неприемлемым. Практически в настоящее время он также неосуществим из-за очень большого количества необходимых запусков ракет. Представляется весьма трудным согласование и утверждение на международном уровне соответствующих международных договоров.

Рассматривалась возможность захоронения отходов во льдах Антарктики или Гренландии. При этом отходы можно было бы расположить на поверхности льда или на небольшой глубине с тем, чтобы за счет выделений тепла при радиоактивном распаде контейнеры могли бы расплавить лед и погрузиться на дно ледового покрова. Достоинствами такого способа являются малая населенность полярных регионов, а также стабильность и толщина (тысячи метров) полярного льда. Недостатками является неопределенность последующего доступа к отходам и возможность изменения толщины ледового покрова в результате изменения климата. Способ также является чрезвычайно дорогим из-за удаленного расположения и капризов погоды. Международный Антарктический договор 1959 г. запретил размещение радиоактивных отходов на Антарктическом континенте.

При захоронении отходов на отдаленных необитаемых островах возникает опасность, связанная с океанским транспортом, особенно при плохой погоде. Многие такие острова находятся в зонах повышенной сейсмической опасности и вулканической активности. Их геологические структуры позволяют морской воде проникать в нижние слои горных пород и, таким образом, оказывать на контейнеры коррозирующее действие.

Изучалась возможность закачки радиоактивных отходов в жидком виде под высоким давлением на глубину от 1

км до 5 км. В этом случае отходы могли бы закачиваться в пористые породы, например, песчаники, перекрытие слоями глинистых сланцев, которые бы изолировали отходонасыщенный слой от подземных вод и окружающей среды. Недостатком способа является необходимость предварительных исследований механических и химических последствий взаимодействия отходов ядерного топлива с горными породами. Другой озабоченностью ученых является возможность утечки жидких масс отходов из пористых формаций.

Учитывая достоинства и недостатки описанных вариантов, Министерством энергетики США в 1983 г. было принято решение о захоронении отходов с высоким уровнем радиоактивности на территории страны и выбраны 9 участков в 6 штатах для рассмотрения возможности их использования в этих целях. Данные по ним собирались примерно 10 лет. Основываясь на результатах изучения этих участков, президент страны одобрил 3 из них для детальных научных исследований. В 1987 г. решением конгресса США был одобрен выбор участка Юкка Маунтейн (Yucca Mountain), штат Невада и в июле 2002 г. было принято окончательное решение по созданию национального хранилища радиоактивных отходов.

Хранилище Юкка Маунтейн расположено в пустыне Невада (рис. 3.1-3.8 цв. вкл.) где в свое время было проведено более 900 испытаний атомных бомб. Этот район площадью более 3,5 тыс. м² окружен еще тысячами гектаров земли, отторгнутой от использования, чтобы служить защитной зоной, создавая незаселенную территорию общей площадью 14,1 тыс. км². Ближайшее к Юкка Маунтейн население живет примерно в 25 км. Ближайший город Лас-Вегас расположен на расстоянии 160 км. Район находится в зоне с сухим климатом, где осадки составляют в среднем менее 19 см в год, большинство которых испаряется, стекая с гор, и только 5% достигает глубины захоронения радиоактивных отходов. Депозитарий будет расположен в твердых

скальных породах на глубине около 300 м от поверхности и в среднем на 300 м выше уровня грунтовых вод.

Юкка Маунтейн очень мало изменилась в геологическом отношении за последние несколько миллионов лет. Широкое научное изучение района показало весьма незначительную вероятность вулканической активности, эрозии, других геологических процессов, которые могли бы нарушить зону хранения.

Ученые изучали район более 20 лет, на что потребовалось 3 млрд. долларов. Общая стоимость строительства составит около 43 млрд. долларов. Хранилище-депозитарий будет сдано в эксплуатацию в 2010 г.

Для более тщательного изучения условий будущего захоронения был пройден разведочный туннель длиной 8 км. Его строительство проводилось в 1993-97 гг. и он включал в себя несколько исследовательских помещений, сооруженных на глубине 300 м от поверхности для подробного изучения свойств горных пород и поведения воды в районе хранилища.

На рис. 3.9 показана передвижная лаборатория, а на рис. 3.10 и 3.11 соответственно начало и окончание проходки разведочного туннеля буровой туннельной машиной. Проходка туннеля и его законченный вид представлены соответственно на рис. 3.12 и 3.13. На рис. 3.14 показаны работы по установке в туннеле анкерных болтов, крепящих металлическую сетку к стенам и кровле туннеля. На рис. 3.15 и 3.16 изображены геологические разрезы по району Юкка Маунтейн с крупными геологическими нарушениями Solitario Canyon Fault Zone, Chost Dance Fault Zone и Imbricate Fault Zone. Петля туннелей связывает Южный и Северный порталы. Вторая петля туннелей будет пройдена под хранилищем на уровне Calico Hills, создавая исследовательский горизонт, позволяющий персоналу наблюдать за состоянием хранилища.



Рис. 3.9. Передвижная геологическая лаборатория

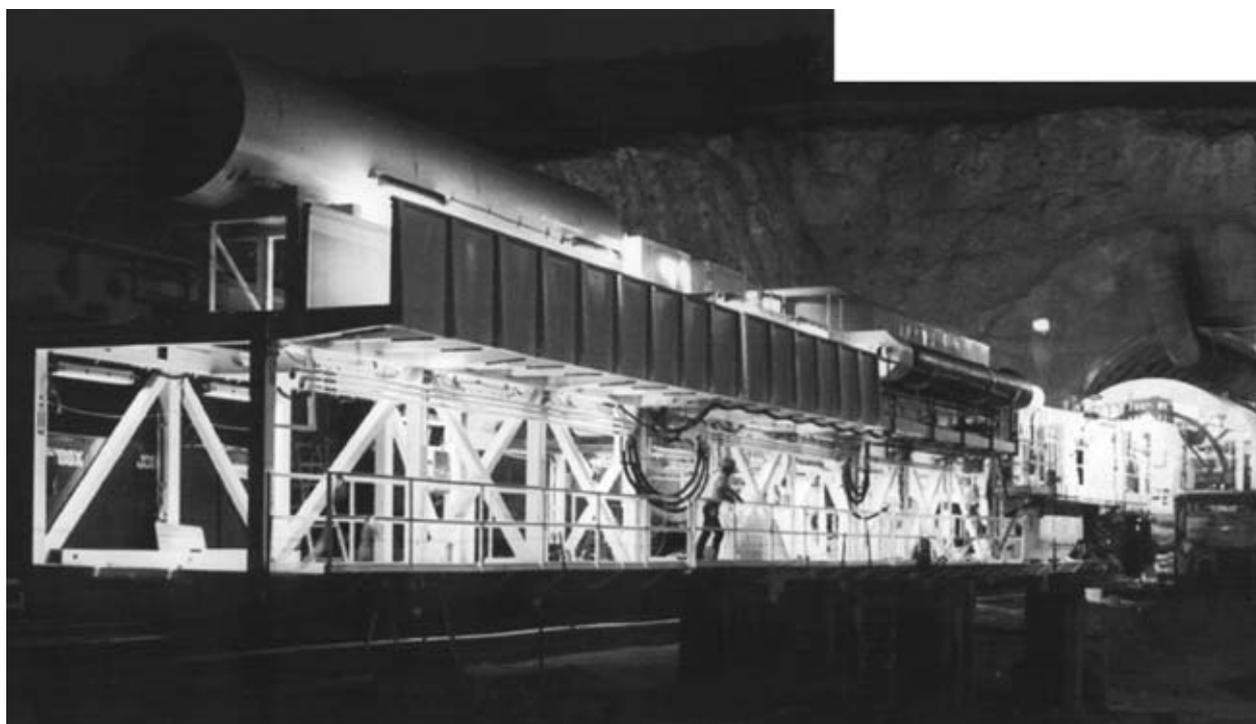


Рис. 3.10. Начало проходки разведочного туннеля буровой туннельной машиной



Рис. 3.11. Окончание проходки разведочного туннеля буровой туннельной машиной



Рис. 3.12. Проходка ответвлений и ниш туннеля проходческим комбайном

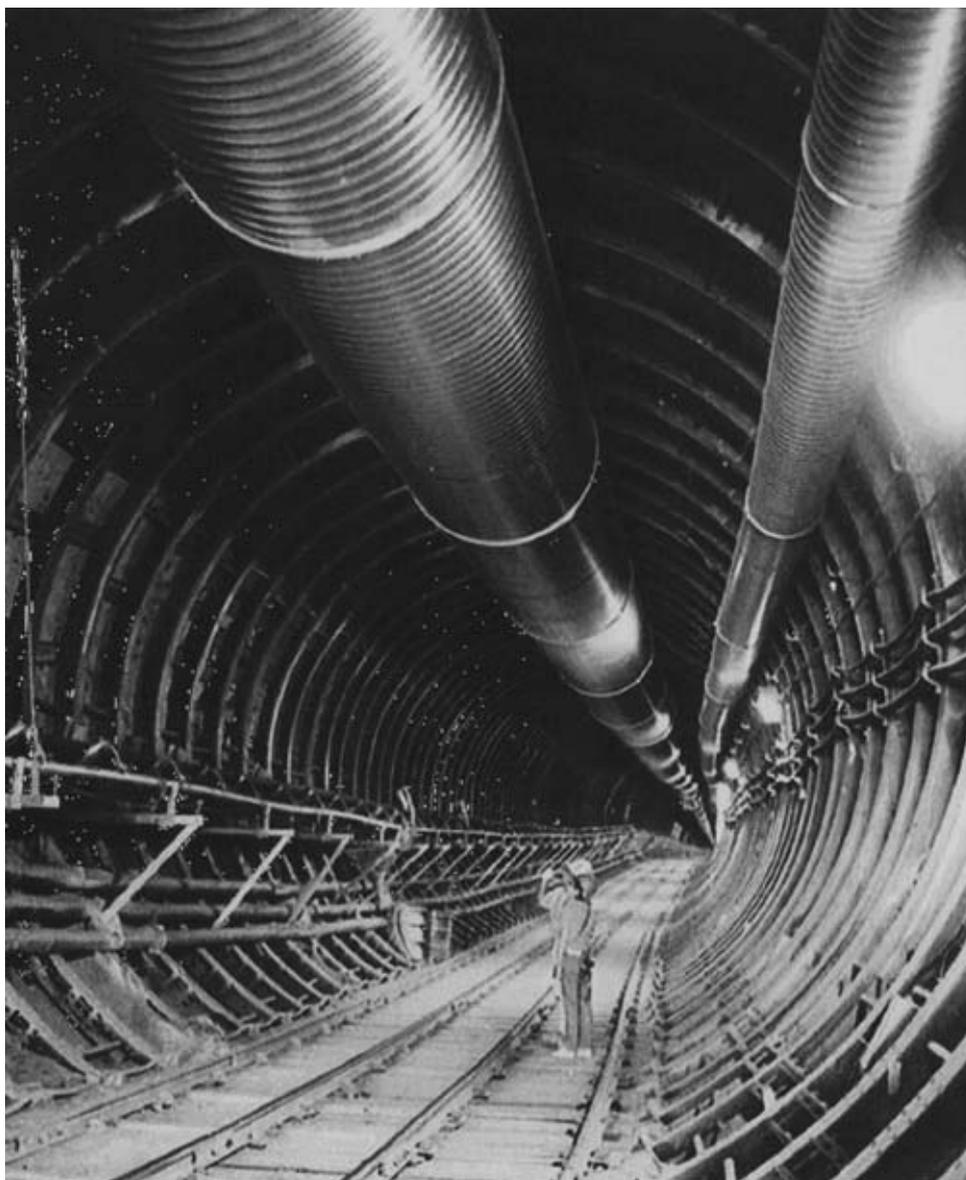


Рис. 3.13. Разведочный туннель после установки металлической крепи



Рис. 3.14. Установка анкерных болтов и металлической сетки для крепления туннеля

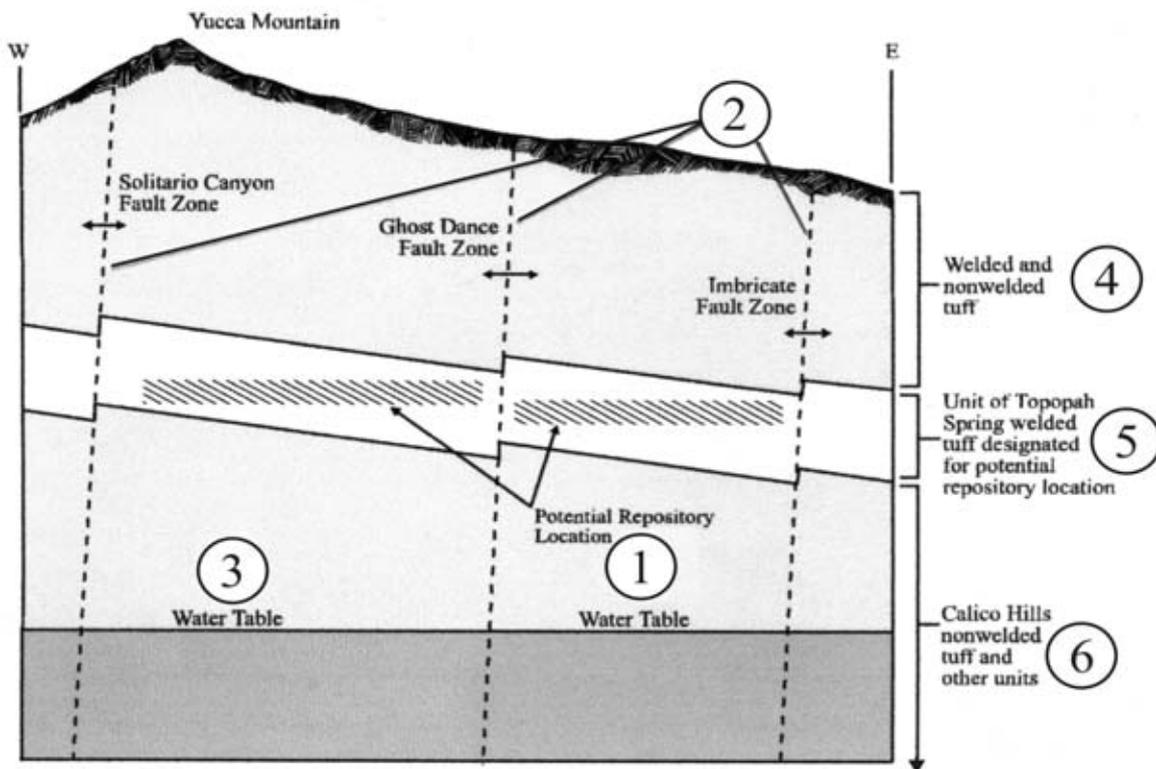


Рис. 3.15. Схема основных геологических нарушений и блоков в районе строительства хранилища Юкка Маунтейн

1 – горизонт расположения хранилища радиоактивных отходов; 2 – геологические нарушения; 3 – уровень подземных вод; 4 – связанные и несвязанные изверженные породы; 5 – связанные породы в месте расположения хранилища; 6 – несвязанные породы формации Calico Hills

На рис. 3.17 (цв. вкл.) 3.18 – 3.19 и 3.20 (цв. вкл.) показаны транспортные туннели и туннели хранения, а также размещение контейнеров с отходами в туннеле хранения.

Предполагается, что хранение отходов должно осуществляться в течение 10000 лет, что связано с длительностью распада радиоактивных элементов. Контейнеры с отходами размещаются примерно в 50 горизонтальных туннелях, каждый длиной 1 км. В период первого столетия ученые будут наблюдать краткосрочные изменения состояния хранилища, связанные, в частности, с движением воды и пара при выделении большого количества тепла из распадающихся отходов.

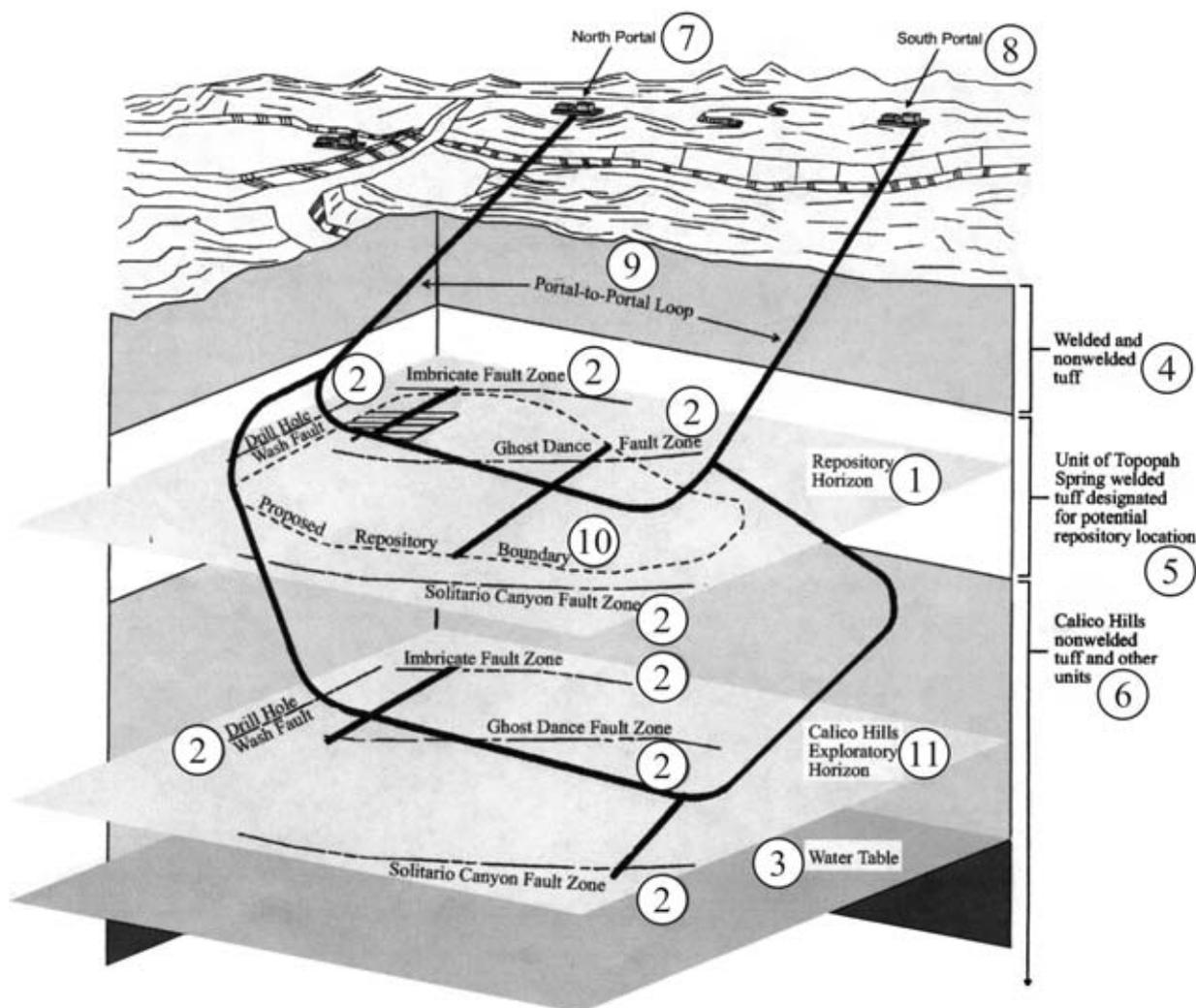


Рис. 3.16. Схема расположения основных туннелей и хранилища Юкка Маунтейн

1 – горизонт расположения хранилища; 2 – геологические нарушения; 3 – уровень подземных вод; 4 – связанные и несвязанные изверженные породы; 5 – связанные породы в месте расположения хранилища; 6 – несвязанные породы формации Calico Hills; 7 – северный портал; 8 – южный портал; 9 – петля основных туннелей; 10 – граница хранилища; 11 – исследовательский горизонт

Хранилище Юкка Маунтейн не будет единственным в США. Еще в 1957 г. Академия наук США рекомендовала для подземного хранения радиоактивных отходов соляные формации. Вначале предполагалось использовать для этой цели отработанную соляную шахту в Канзасе. Однако, геологические условия и сильная оппозиция политиков штата заставила отказаться от этой идеи и рассмотреть возможно-

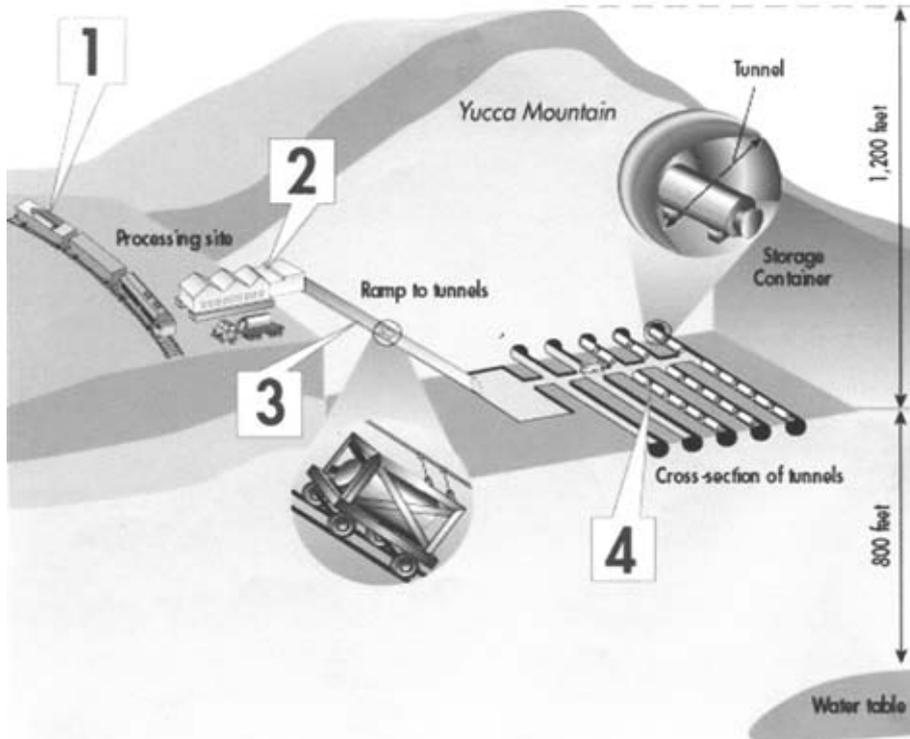


Рис. 3.18. Схемы перегрузочных операций при хранении радиоактивных отходов

1 – транспортировка контейнеров с отходами по главному туннелю рельсовым транспортом; 2 – перегрузка контейнеров в транспортный туннель; 3 – транспортировка контейнеров автоматизированной системой; 4 – укладка контейнеров в туннели хранения

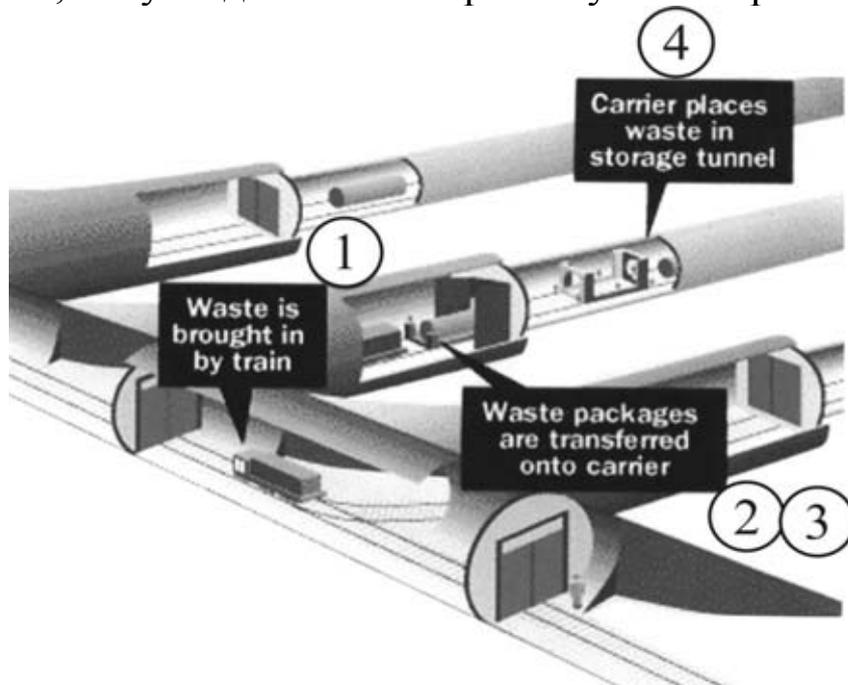


Рис. 3.19. Схемы перегрузочных операций при хранении радиоактивных отходов

(номера позиций соответствуют позициям рис. 3.18)

сти соляного месторождения, расположенного в 50 км восточнее г. Карлсбад (Carlsbad), штат Нью-Мексико. Потребовалось еще 30 лет для изучения и обсуждения возможности захоронения здесь радиоактивных отходов со средним уровнем радиоактивности.

Проект ВИПП (WIPP-Waste Isolation Pilot Plant) (рис. 3.21-3.24 цв. вкл.) начал осуществляться в 1981 г., а первые грузы отходов поступили в 1999 г. Общая запланированная емкость хранилища – 165 тыс. м³ отходов. Место хранилища определилось наличием соляного пласта Саладо (Salado), который залегает на глубине 270-914 м, имеет мощность более 600 м и возраст 225 млн. лет. Эта формация имеет стабильное залегание, она достаточно мощная и сухая для расположения комплекса хранения.

Геологически участок, пересекаемый стволами ВИПП, состоит из следующих слоев:

- формация Santa Rosa, покрывающая район отдельными участками;
- формация Jewey Cake Redbeds – несвязанная структура, состоящая из фракций, наполненных водой, ниже 150 м – гипсом;
- формация Rustler, являющаяся главным водоносным слоем района;
- формация Salado, образовавшаяся испарением древнего моря. Солевые слои здесь чередуются со слоями глины и ангидрита;
- формация Castile, залегающая непосредственно под формацией Саладо. У ее вершины находится огромный резервуар соленой воды.

В общем случае основным препятствием для сооружения хранилищ радиоактивных отходов является наличие грунтовых вод, которые могут быть заражены радиоактивностью. Неуправляемые потоки этих вод могут загрязнить поверхностные водоемы. Наличие же мощного соляного месторождения типа формации Саладо само по себе являет-

ся доказательством отсутствия таких вод. Кроме того, поскольку соль является пластичным минералом, полости в котором смыкаются с течением времени, складированные отходы в них будут надежно запечатаны.

К месту расположения хранилища ВИПП на глубину 655 м пройдены 4 вертикальных ствола – один, используемый для выдачи соли при строительстве, второй для спуска транспортируемых радиоактивных отходов, а также воздухоподающий и вентиляционный стволы.

Хранилище будет состоять из десяти панелей: двух – у центральных туннелей и восьми боковых. В настоящее время построены панели 1 и 2 (рис. 3.25-3.27 цв. вкл.). Панели состоят из 7 камер с длиной каждой более 90 м, шириной 10 м и высотой 4 м. Первая панель используется с 1986-88 гг., хотя первоначально предполагалось, что она будет служить не более 5 лет из-за пластичных свойств соли. Эти свойства проявляются, в основном, в том, что соль в кровле панели трескается и иногда отделяется от слоев глины, залегающих над ней.

Панели крепятся анкерной крепью с длиной болтов 2...3 м и арматурной сеткой. Некоторые камеры в панели 1 закреплены во второй и даже третий раз, чтобы удержать отделяющуюся соль от падения.

3.2 Хранение радиоактивных отходов в странах мира

Опыт хранения радиоактивных отходов имеется также в разных странах мира. Так, в **Швеции** отходы низкого и среднего уровня радиоактивности, поступающие из госпиталей, исследовательских лабораторий, промышленности направляются для захоронения в подземное хранилище SFR (рис. 3.28 цв. вкл.). Оно построено в кристаллических метаморфизованных породах на глубине 60 м под Балтийским морем возле Форсмарка (Forsmark) и используется с 1988 г. Здесь помещенные в медные канистры отходы хранятся на

глубине 500 м от поверхности воды в скважинах, заполненных глиной.

Хранилище состоит из двух частей – поверхностного и подземного комплексов. На поверхности расположено производство по изготовлению бентонитовых (из коллоидной глины) блоков для заполнения скважин и комплекс приема прибывающих отходов.

К подземному комплексу подходят два параллельных наклонных туннеля, по одному из которых транспортируются грузы, а по второму люди. В состав комплекса входят четыре горизонтальных хранилища длиной по 160 м (рис. 3.29 цв. вкл.), где отходы хранятся в скважинах глубиной 8 м и диаметром 2 м (рис. 3.30 цв. вкл.), и вертикальный силос с помещениями для отходов разного уровня радиоактивности. Диаметр силоса 25 м, высота 50 м. Силос закреплен бетоном толщиной 0,8 м, а его закрепное пространство заполнено бентонитовой глиной, предотвращающей приток в силос подземных вод (рис. 3.31 цв. вкл.).

Отходы с более высокой степенью радиоактивности размещаются в силосе в специальных шахтах, после этого заполняемых бетоном, отходы с меньшей степенью радиоактивности размещаются в горизонтальных хранилищах. После заполнения всех скважин горизонтальное хранилище закладывается смесью бентонитовой глины и дробленой породы.

Особенностью хранилища является то, что канистры могут быть извлечены, если в будущем будет решено по каким-либо причинам восстановить хранимое топливо.

Для хранения отработанного ядерного топлива высокого уровня радиоактивности сооружено хранилище жидких отходов СЛАВ (рис. 3.32 цв. вкл.). Отходы прибывают в специально спроектированном корабле в особых сосудах, которые предотвращают радиоактивное излучение и защищены от повреждений. После предварительного охлаждения и выемки отходов из транспортных сосудов они поме-

щаются в канистры хранения. Эти операции проводятся под водой в приемном комплексе. Затем, все еще под водой, эти канистры опускаются специальным лифтом в бассейны, расположенные на 25-30 м ниже уровня поверхности, после чего вмуровываются в бетон для окончательного захоронения в подземном хранилище. Общая емкость хранилища составляет 60 тыс. м³, в настоящее время заполнена половина. Предусмотрено расширение хранилища, после которого его окончательная емкость составит 100 тыс. м³. С поверхностью хранилище связывают два параллельных туннеля, один из которых используется для транспорта грузов, второй – для людей.

В Швеции рассматривается вопрос о строительстве глубокого хранилища ядерных отходов среднего уровня радиации общим объемом около 9 тыс. т (рис. 3.33 цв. вкл., рис. 3.34). Предполагается, что подземная часть этого хранилища займет территорию 2-4 км² и будет расположена на глубине 400...700 м в гранитах или гнейсах. Хранилище будет строиться в две стадии, первая из которых примет около 10% общего объема радиоактивных отходов. План хранилища показан на рис. 3.34 а. Размеры туннелей (рис. 3.34 б) и различных залов (рис. 3.34 в) зависят от их назначения. Те из них, которые обеспечивают доступ к подземным полосам, имеют ширину 5...8 м, что определяется габаритами транспортных средств и грузопотоком. Туннели для других функций, таких, как вентиляция, энергоснабжение и др. имеют ширину 8...15 м и такие же размеры по высоте. Размеры туннелей для складирования отходов зависит от емкостей, в которых находятся отходы, и машин, используемых для бурения скважин большого диаметра, где эти емкости размещаются. Подобным машинам, используемым в настоящее время, требуются размеры туннелей 5,5х5,5 м.

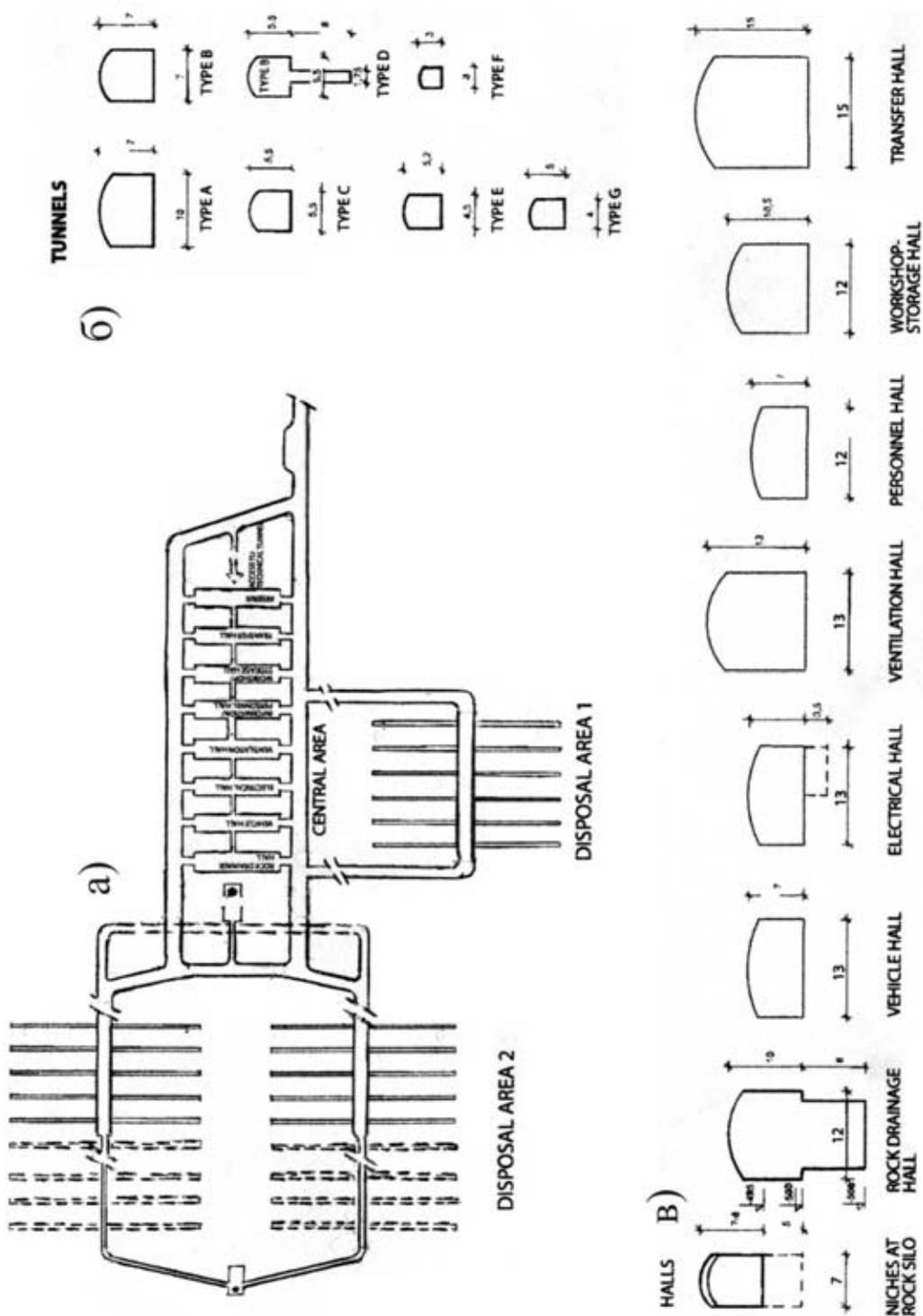


Рис. 3.34. План и сечения туннелей и подземных залов хранилища отходов в Швеции

а – план хранилища; **б** – сечения туннелей различных типов; **в** – сечения залов разного назначения

В **Нидерландах** разработана концепция хранения радиоактивных отходов в соляных формациях. Хранилище будет состоять из ряда горизонтальных галерей длиной по 200 м, пройденных с интервалом 40 м. В их стенах каждые 10 м бурятся короткие горизонтальные скважины длиной по 4,3 м, в которых размещаются контейнеры с радиоактивными отходами. Кольцевое пространство вокруг контейнера заполняется дробленой каменной солью. Такая схема предполагает возможность извлечения контейнеров через 100 лет, когда специальной машиной будет разбурено кольцо дробленой соли вокруг контейнера.

В **Финляндии**, в Олкилуото (Olkiluoto) подземное хранилище отходов среднего и низкого уровня работает с 1992 г. Здесь отходы хранятся в силосах, закрепленных бетоном, на глубине 70...100 м (рис. 3.35 цв. вкл.). Срок службы хранилища - 40 лет. На рис. 3.36 (цв. вкл.) показано хранилище Ловииса (Loviisa), которое строится в гранитном массиве между двумя зонами тектонических нарушений и расположено на глубине 110 м. Хранилище предназначено для отходов местной атомной электростанции и строительство будет выполняться в три стадии, последняя из которых намечена на 2020 г.

На рис. 3.37 показана схема подземного хранилища радиоактивных отходов, запланированного в **Бельгии**. К туннелям хранения будет пройдено два вертикальных ствола: ствол А – для грузоподъемных операций и выдачи исходящей струи воздуха и ствол В для спуска-подъема людей и подачи свежего воздуха. В первый период складирования отходов будут использоваться галереи 1-5, в дальнейшем – галереи 6-10. В туннелях хранения в стены или почву бурятся скважины, где располагаются канистры с отходами.

На рис. 3.38 (цв. вкл.) показан перспективный комплекс хранения Опалинус (Opalinus), **Швейцария**. Место строительства расположено на севере страны возле границы с Германией. К месту хранения с поверхности будут пройде-

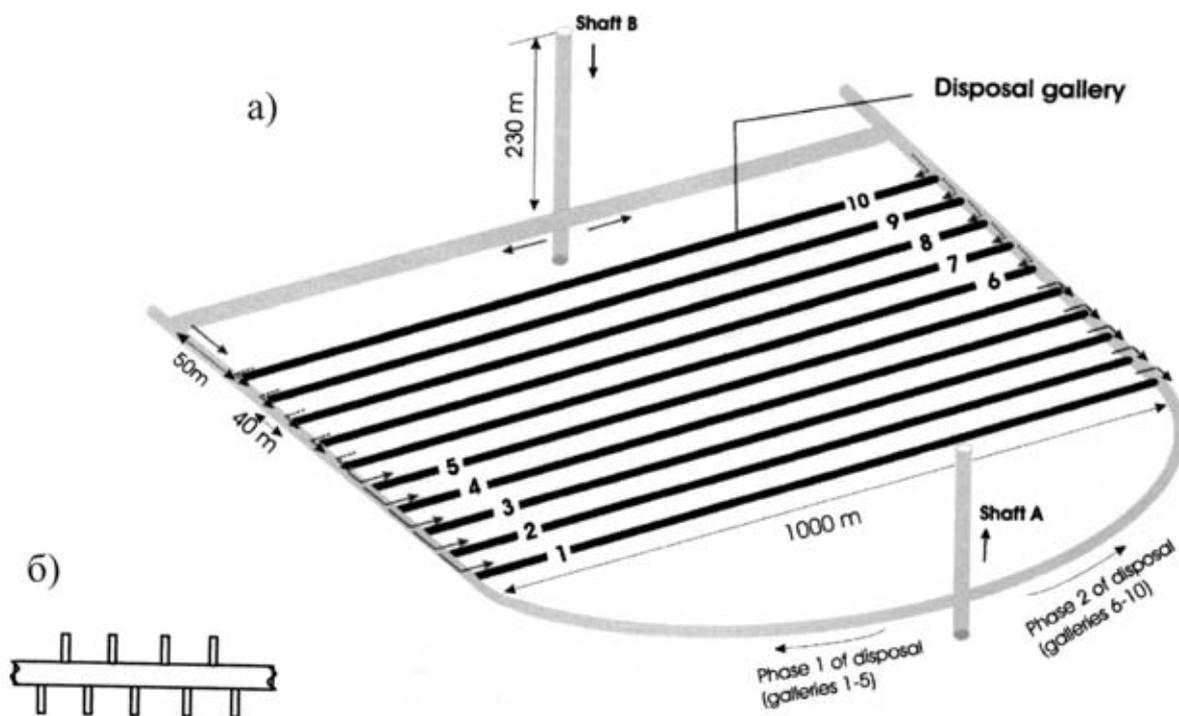


Рис. 3.37. Схема хранилища отходов в Бельгии

а - комплекс подземного хранения отходов; б – схема бурения скважин в стены туннеля

ны вертикальный ствол и подводящий наклонный туннель. Хранилище общей площадью 2 км^2 располагается в глиняной формации Опалинус Клей (Opalinus Clay).

На рис. 3.39 (цв. вкл.) и 3.40 (цв. вкл.) представлены соответственно европейская и японская концепции подземного хранения отходов с высоким уровнем радиоактивности.

Кроме проектирования и строительства хранилищ радиоактивных отходов, в последние годы большое внимание уделяется изучению условий их хранения. С этой же целью в разных странах сооружаются подземные исследовательские лаборатории, часть которых будет существовать длительное время для чисто научных целей, другая часть после выполнения научных функций расширяется, чтобы использоваться в качестве хранилища. Так, в **Японии** опубликована программа исследовательских и проектных работ строительства хранилища ядерных отходов в г. Хоронобе (Hornobe-town), остров Хоккайдо (рис. 3.41 цв. вкл.). По этой

программе намечено строительство подземной лаборатории, руководством которой с властями острова заключено соглашение о том, что для исследований не будут завозиться отходы с высоким уровнем радиоактивности, а ее подземные комплексы – использоваться для складирования отходов. В лаборатории будут изучаться условия их хранения, разрабатываться методология и техника наблюдений, инженерные решения для создания подземных хранилищ на большой глубине.

К месту расположения лаборатории на глубине 500 м намечена проходка 3 вертикальных стволов, расстояние между которыми равно 70 м. Два из них – грузоподъемные, диаметром по 6,5 м, вентиляционный – 4,5 м. Экспериментальные туннели арочного сечения с шириной 4 м проходятся на глубине 250 м и 500 м общей длиной 1600 м.

Для решения вопросов хранения отходов с высоким уровнем радиоактивности и длительным периодом распада во **Франции** строится и в 2006 г. будет завершена подземная исследовательская лаборатория на глубине 500 м в глиняной формации возрастом 150 млн. лет (рис. 3.42 цв. вкл.). Здесь будут пройдены два туннеля длиной несколько сот метров в северо-западном и северо-восточном направлениях, выбранных в соответствии с региональными зонами нарушенных пород. Туннели крепятся металлическими арками с шириной пролета 4 м и интервалом 1 м. почва покрывается бетоном и, если необходимо, арки будут дополнены анкерными болтами и бетоном.

Подобные задачи поставлены перед лабораторией ОНКАЛО (ONKALO), Финляндия, которая будет строиться в г. Олкилуото (Olkiluoto) (рис. 3.43 цв. вкл.). Исследовательский комплекс располагается на фактической глубине будущего хранилища 400...500 м и в дальнейшем войдет в него составной частью. Предусмотрена проходка подводящего наклонного туннеля, вертикальной вентиляционной шахты и исследовательских горизонтов.

Подземная исследовательская лаборатория Манитоба (Manitoba), Виннипег, **Канада**, предназначена для изучения условий хранения отработанного ядерного топлива в стабильных породах Канадского геологического щита. Главные горные работы, предпринятые для сооружения лаборатории, включают в себя главный ствол глубиной 443 м, исследовательские комплексы на горизонтах 240 м и 420 м, промежуточные приствольные станции на горизонтах 130 м и 300 м и вентиляционную скважину диаметром 1,8 м (рис. 3.44). В состав подземных комплексов входят туннели шириной 3,5 м, высотой 3,5 м, которые проходятся буровзрывным способом. Применяемый в них метод контурного взрывания (расположение скважин в сечении туннеля см.

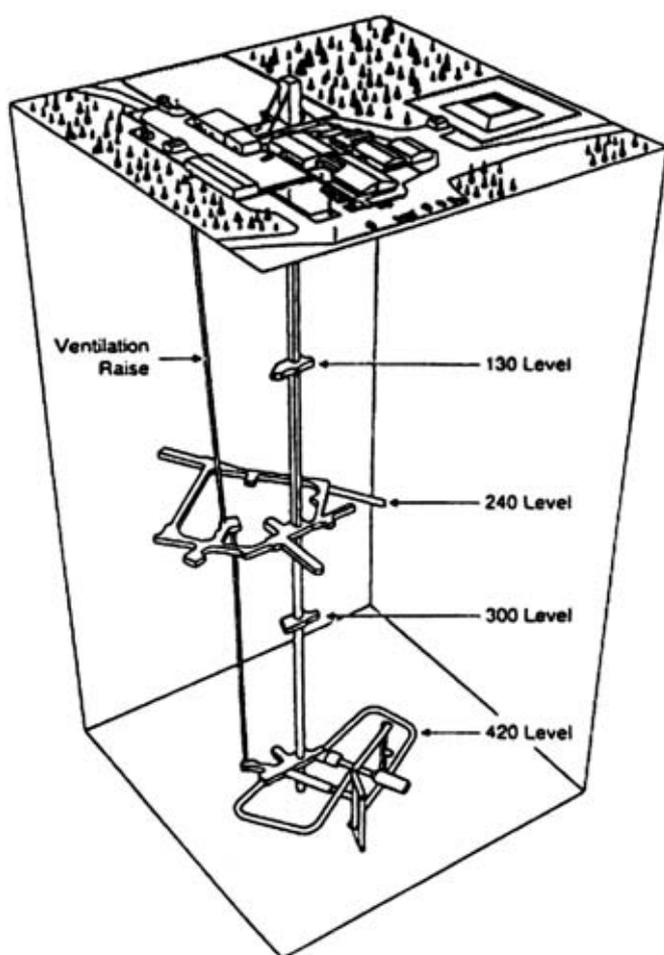


Рис. 3.44. Схема расположения основных горных выработок подземной лаборатории Манитоба

рис. 3.45) позволяет обеспечить проектный размер сечения без дополнительных работ по выравниванию его очертаний после взрывания (рис. 3.46).

Лаборатория Хейдес (Hades), **Бельгия**, исследующая возможности хранения радиоактивных отходов с высоким уровнем радиоактивности, расположена на глубине 223 м и имеет 2 вертикальных ствола и горизонтальный туннель (рис. 3.47). Она предназначена для исследования возможности складирования отходов в мощном слое глины, которая из-за своих пластичных свойств

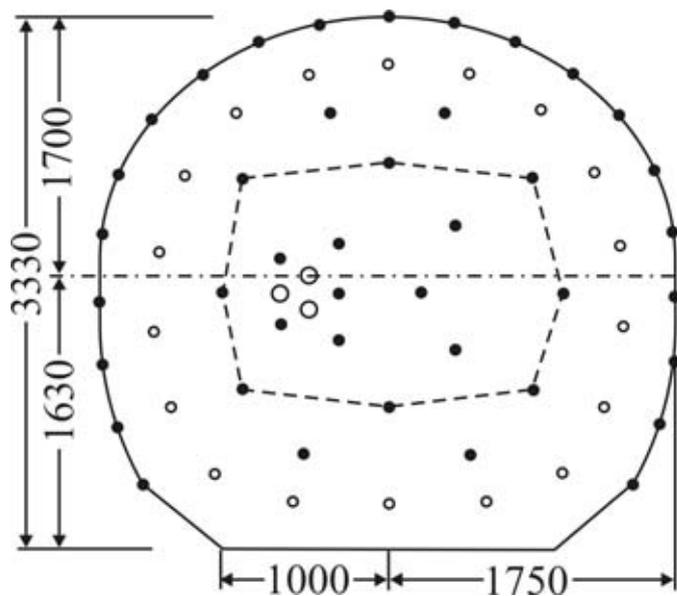


Рис. 3.45. Расположение скважин для взрывных работ в сечении туннеля

имеет склонность к конвергенции, т.е. смыканию с течением времени контуров горных выработок.

При сооружении подземных хранилищ отходов с высоким уровнем радиоактивности, кроме обычных вопросов геомеханики и устойчивости горных выработок, возникают совершенно новые проблемы, связанные с высокой температурой отходов. Так, моделирование глу-



Рис. 3.46. Вид участка туннеля после проведения взрывных работ и отгрузки отбитой породы

бины хранения более 200 м отходов атомных электростанций, имеющих температуру 200° , и более холодных ($60^{\circ}\dots 90^{\circ}\text{C}$) отходов ядерного оружия показали, что после 500 лет хранения в окружающих породах возникают значительные и необратимые изменения. Подземная вода, содержащаяся в окрестностях захороненных отходов под воздействием их высокой температуры испаряется. Пар, перед тем, как сконденсироваться, распространяется на десятки метров. Конденсированная вода растворяет малые количества минералов, подстилающих поры горных пород и зоны их дробления (рис. 3.48 цв. вкл., 3.49 цв. вкл.). Когда вода затем стекает вниз к хранилищу отходов, она также растворяет минералы, которые с течением времени аккумулируются и создают над туннелями хранения купола уплотненных горных пород. При росте температуры размер купола увеличивается. Эти купола продолжают существовать даже после 3000 лет хранения.

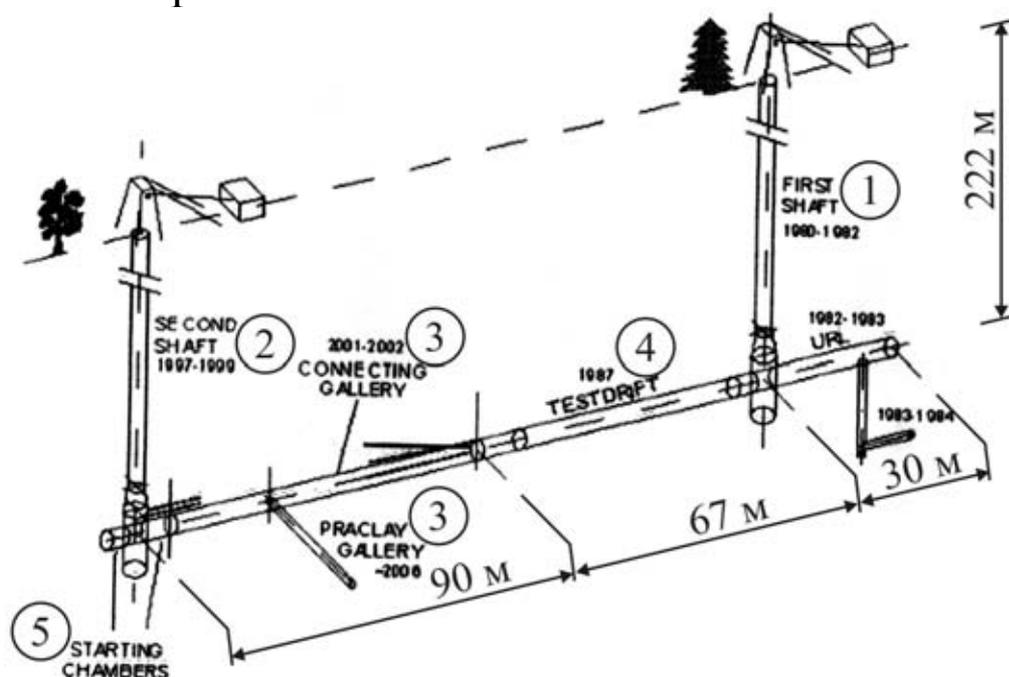


Рис. 3.47. Схема основных горных выработок подземной лаборатории Хейдес

1 – первая шахта (ствол); 2 – вторая шахта (ствол); 3 – горизонтальный туннель; 4 – исследовательский туннель; 5 – строящиеся исследовательские станции

На рис. 3.50 (цв. вкл.) показаны поперечный и продольный разрезы по туннелям хранилища, на которых видно, что размер купола уплотненных пород над туннелем с «горячими» отходами (розовый цвет) значительно выше, чем над «холодными».

Другой современный подход к изучению состояния и механики горных пород на больших глубинах хранилищ ядерных отходов – применение неразрушающих горный массив методов томографии, известных в медицине, которые позволяют послойно исследовать внутреннюю структуру объекта звуковыми или сейсмическими волнами.

ГЛАВА 4. НАУЧНЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ СТРУКТУРЫ

4.1 Физические лаборатории США

Научные лаборатории являются уникальными по размерам и методам строительства подземными структурами. Установка современных физических приборов требует сооружения весьма крупных полостей, компоновка которых определяется взаимодействием установленного в них оборудования. Соответственно усложняются крепь этих полостей и производство горно-проходческих работ.

Главная причина подземного расположения физических лабораторий – необходимость создать щит для очень чувствительных детекторов от космических лучей, попадающих на поверхность Земли из внешнего пространства. Вспышки в детекторах на поверхности Земли, вызываемые элементарными частицами космических лучей, существенно преобладают над вспышками нейтрино, маскируя наличие последних, которые, собственно, и являются объектом исследования.

При расположении лабораторий под землей количество частиц космических лучей существенно уменьшается, поскольку они поглощаются толщей горных пород, покрывающих подземные полости.

Подземная физическая лаборатория Саудан (Soudan Underground Physics Laboratory) расположена в Сан-Луи, штат Миннесота в железорудной шахте, закрытой около 40 лет назад. Геологический разрез месторождения показан на рис. 4.1. Лаборатория состоит из трех комплексов.

Первый из них – Саудан-1 – расположен на 23 горизонте шахты и начал вести физические исследования с 1980 г.

Вторым комплексом является первая фаза лаборатории Саудан-2, расположенная на 27 горизонте шахты на глубине 713 м, работающая с 1989 г. (рис. 4.2). Она состоит из подводящих выработок и основной полости длиной 72 м, ши-

риной 14 м и высотой 12 м.

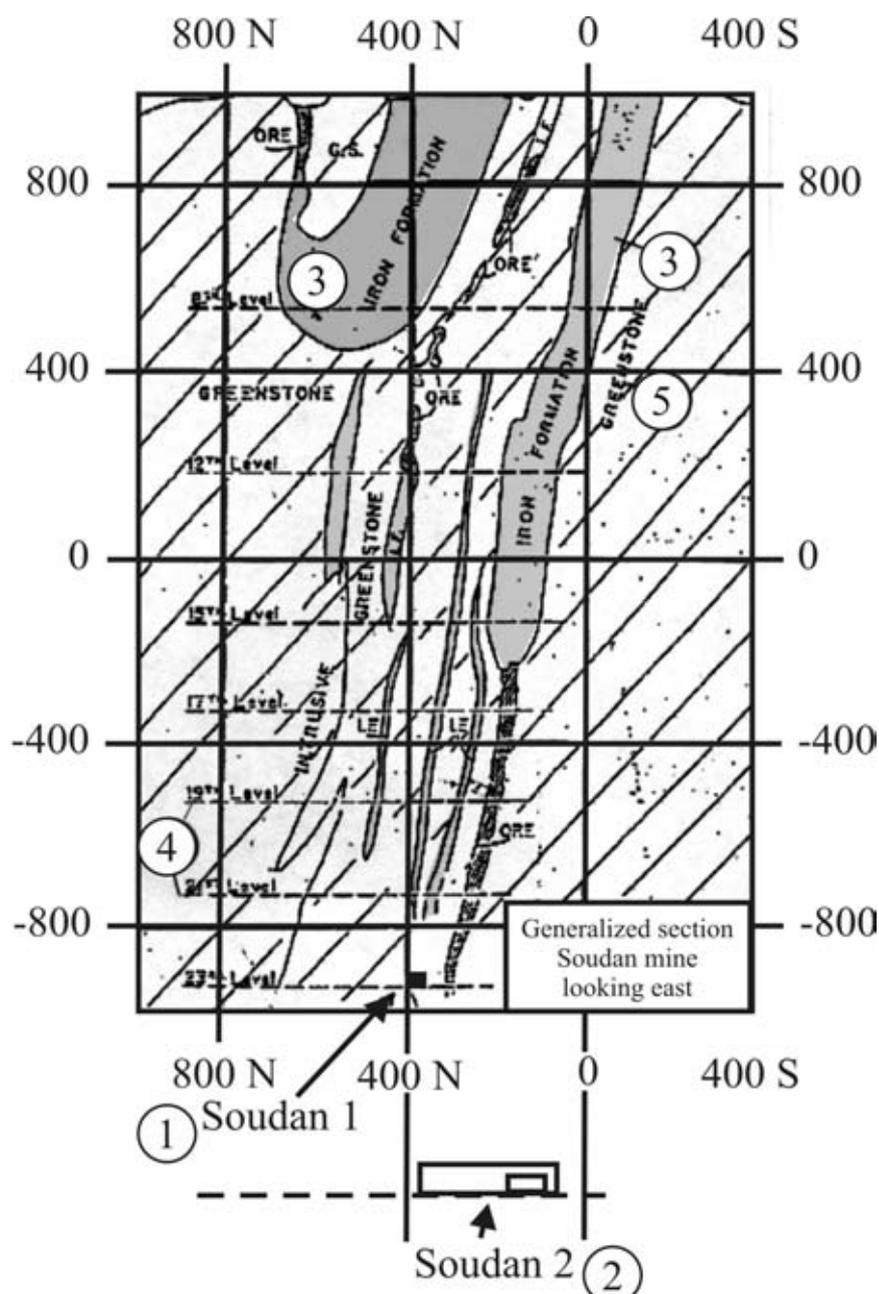


Рис. 4.1. Геологический разрез месторождения Саудан

1 – лаборатория Саудан-1 на 23 горизонте шахты; 2 - лаборатория Саудан-2 (включая проект NUMI-MINOS) на 27 горизонте; 3 – месторождение железной руды; 4 – горизонты разработки; 5 - диорит

Третий комплекс также расположен на 27 горизонте шахты и является составной частью лаборатории Саудан-2. Его строительство завершается и первые научные результаты ожидаются в 2005 г. Здесь расположен современный детектор обнаружения элементарных частиц MINOS, для ко-

того сооружена полость длиной 82 м, шириной 14,5 м и высотой 12 м.

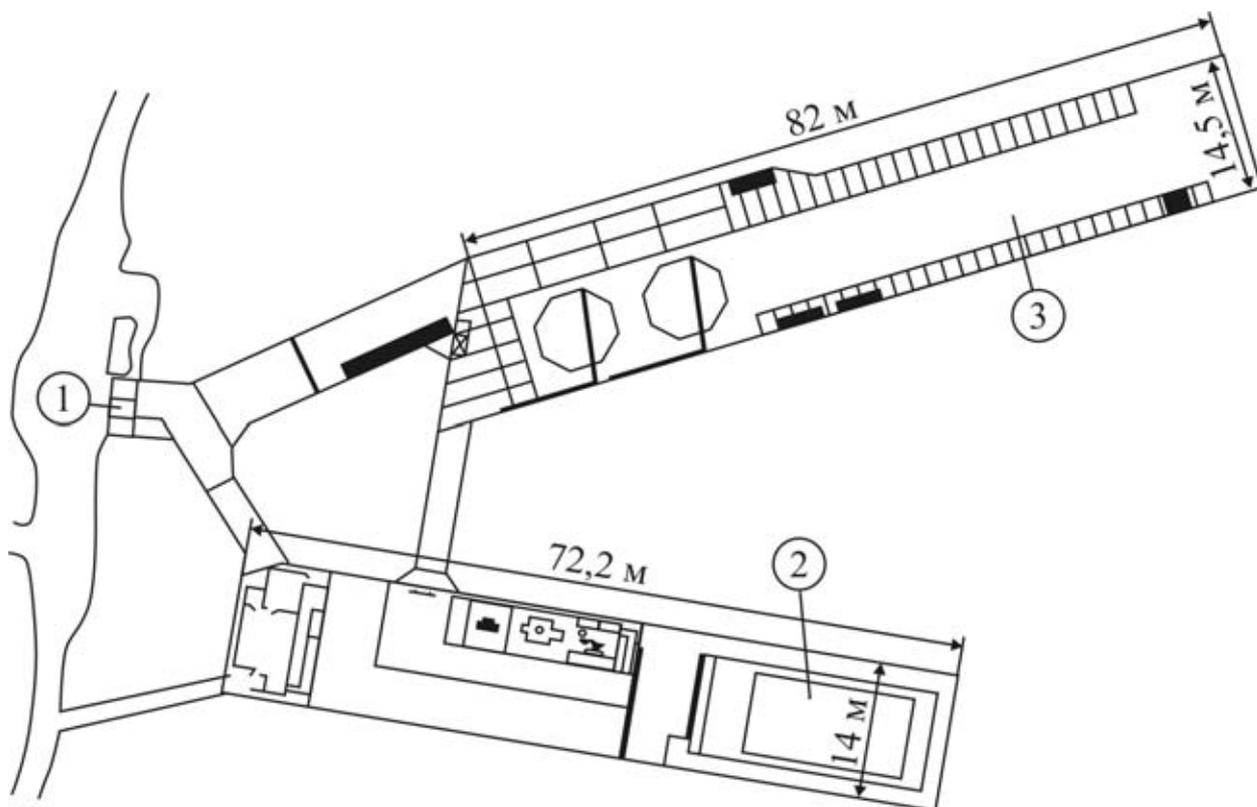


Рис. 4.2. Подземный лабораторный комплекс Саудан-2

1 – существующий ствол; 2 – полость действующей лаборатории Саудан-2; 3 – полость «дальнего» детектора MINOS

Лабораторные комплексы шахты Саудан перекрыты толщей плотного гранита с возрастом примерно 2 млрд. лет.

Естественная температура в шахте составляет 11°C , относительная влажность воздуха почти 100%, но лаборатория с годами работы приобрела температуру 22°C и влажность 50%. Поскольку свежий воздух в лабораторию MINOS будет поступать из шахты, его температура и влажность сравняются с шахтными.

Научные лаборатории обслуживаются существующим грузоподъемным стволом № 8 бывшей шахты Саудан, наклоненным к горизонту под углом 78° (рис. 4.3) с клетями размерами в плане 2×1 м, которые могут поднимать или спускать грузы длиной до 12 м и весом до 6 т. В будущем для нормальной работы лаборатории намечается пройти но-

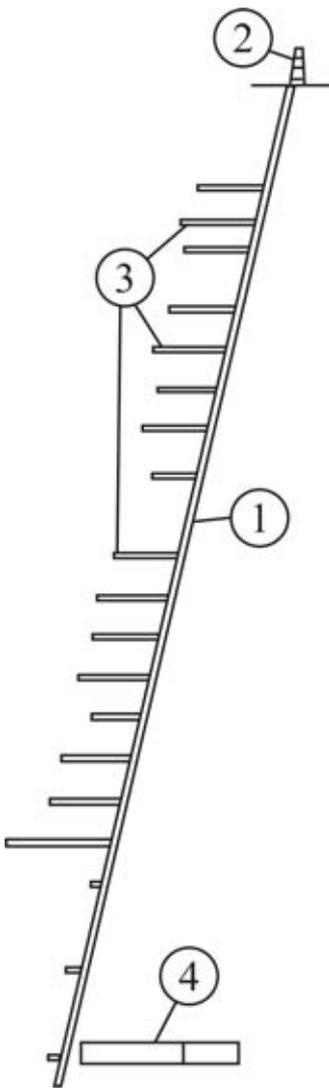


Рис. 4.3. Схема вскрытия шахты Саудан
1 – ствол; 2 – поверхностный комплекс; 3 –
вскрывающие выработки горизонтов; 4 - лабо-
ратория Саудан-2

вый вертикальный ствол диаметром 5 м с поверхности до глубины 1450 м и «слепой» (т.е. без выхода на поверхность) ствол с этой глубины до горизонта 2500 м. Предполагается также проведение наклонного туннеля под углом 8° с размерами сечения 5×4 м между горизонтами 1450 м и 2500 м.

Не вдаваясь подробно в физические проблемы, решаемые лабораторией Саудан, следует только отметить, что она является одним из самых известных в мире подземных научных центров. На глубине ее расположения количество элементарных частиц, приносимых космическими лучами, уменьшается в 100 тыс. раз по сравнению с исходной величиной, наблюдаемой

на поверхности.

Вот почему физиками мира с большим интересом ожидаются результаты работы детектора MINOS, тем более, что, кроме самостоятельных функций, он является также составной частью проекта NuMi-MINOS.

Согласно этому проекту ускоритель лаборатории Фермилаб (Fermilab-Fermi National Accelerator Laboratory), расположенной в 70 км от Чикаго, будет генерировать поток протонов (рис. 4.4-4.6 цв. вкл.). Этот поток направляется в специальную графитовую мишень, где производит новые частицы, называемые пюонами. Далее пюоны двигаются вдоль трубы длиной 670 м, находящейся в «туннеле распада» (Decay Tunnel) (рис. 4.7-4.10 цв. вкл.), где они распадаются, производя нейтроны. Создаются также и другие час-

тицы, но они останавливаются в конце трубы стальным «адсорбером» толщиной 10 м и горными породами толщиной 240 м.

Нейтрино, практически не задерживаясь этими препятствиями, проходят сквозь них и сквозь земную толщу между лабораториями Фермилаб и Саудан равную 735 км. Детекторы, расположенные вблизи лаборатории Фермилаб («ближний» NuMi) и в лаборатории Саудан («дальний» MINOS) (рис. 4.11-4.14 цв. вкл.), будут сопоставлять количество обнаруженных частиц, что, возможно, позволит ученым выявить массу нейтрино. Детектор Саудана («дальний» - MINOS) состоит из двух идентичных супер-модулей, каждый из которых имеет длину 15 м и ширину 8 м. Вместе они весят более 6 тыс. т. Детектор Фермилаба («ближний» NuMi) подобен «дальному», но весит 1 тыс. т.

Полость, пройденная и подготовленная для установки оборудования первой фазы лаборатории Саудан-2, показана на рис. 4.15 (цв. вкл.).

Проходка горных выработок лаборатории Саудан производилась с помощью буровзрывных работ. Было извлечено около 100 тыс. м³ породы. Работы по строительству полостей велись с проведением вначале опережающего туннеля малого сечения в кровле полости с последующим его расширением. Поддержание кровли осуществлялось анкерными болтами, набрызгбетоном и железобетонной крепью.

При строительстве комплекса NuMi лаборатории Фермилаб в районе «зала мишени» (Target Hall) были пройдены две шахты диаметром по 8 м. Отсюда началась проходка туннеля буровой туннельной машиной диаметром 6,5 м. После проходки туннеля машина была выдана на поверхность через шахту «ближнего» детектора (рис. 4.16).

Подземные помещения лаборатории, кроме научного оборудования, оснащены мостовыми кранами, электрическими, вентиляционными и управляющими системами (рис. 4.17 цв. вкл.)

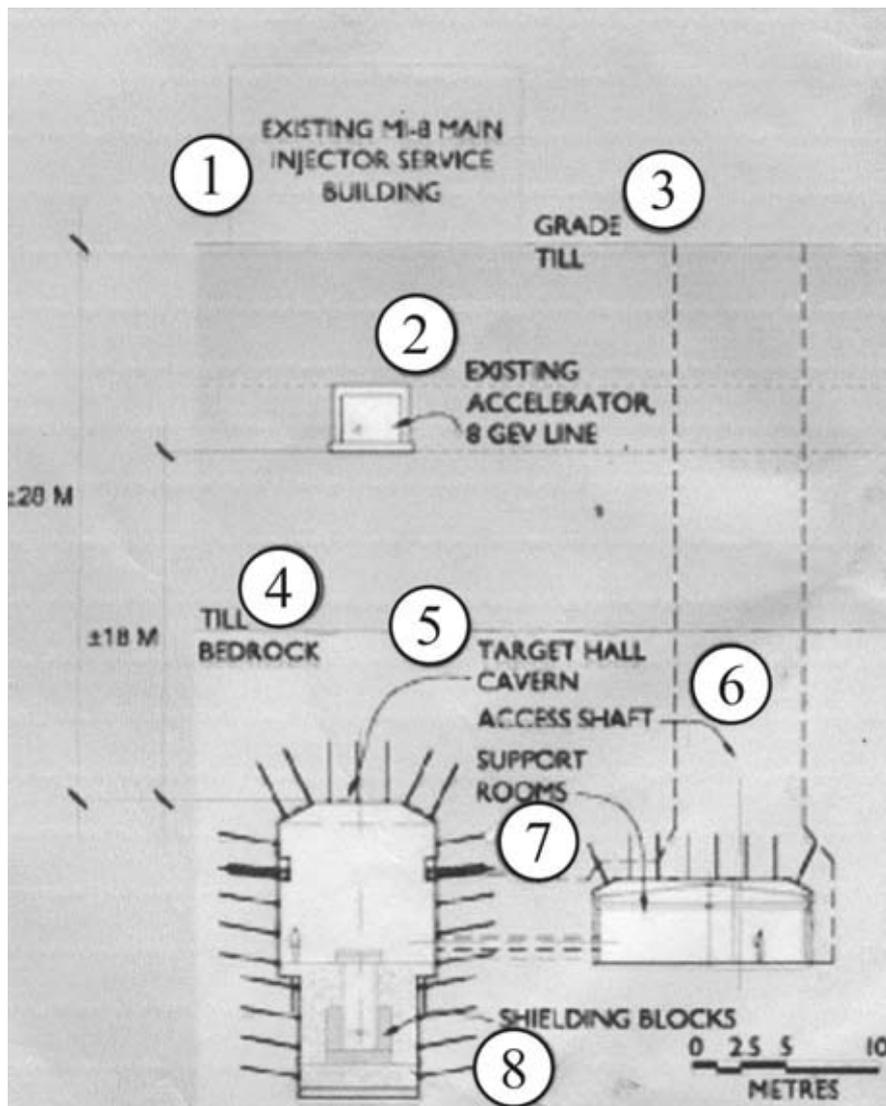


Рис. 4.16. Последовательность строительства подземной полости зала мишени «Target Hall» лаборатории Фермилаб
 1 – существующее здание служб главного инжектора; 2 – существующий ускоритель; 3 – уровень валунной глины; 4 – уровень скальных пород; 5 – полость зала мишени; 6 – вертикальная шахта; 7 – вспомогательные камеры; 8 – блоки защиты оборудования

Подземная национальная лаборатория Хоумстейк (Homestake Underground National Laboratory) располагается в бывшей золотодобывающей шахте Хоумстейк, штат Южная Дакота, США (рис. 4.18 цв. вкл.). Шахта работала примерно 125 лет, была закрыта в 2000 г. и имеет более 800 км горных выработок на разных горизонтах с наибольшей глубиной разработки 2,6 км.

Месторождение золота вскрыто двумя главными ство-

лами Ятес и Росс, достигающих глубины 4850 футов (1480 м) (рис. 4.19 цв. вкл.). Ствол Ятес закреплен деревянной крепью и разделен на четыре отделения – два скиповых для выдачи руды и два клетевых для людей и оборудования. Ствол Росс оборудован двухскиповым и двухэтажным клетевым подъемами. На горизонте 4850 ф стволы связаны главным туннелем длиной 1 км и сечением 4x4 м. Горизонты ниже 4850 ф вскрыты так называемыми «слепыми» стволами, не имеющими прямого выхода на поверхность. Подъемное оборудование в стволах было установлено еще в годы Второй мировой войны.

Рудное тело каждые 45...50 м по глубине вскрыто участковыми продольными и поперечными выработками, через которые производилась добыча руды (рис. 4.20 цв. вкл.).

При размещении лаборатории в шахте Хоумстейк будут использоваться стволы Ятес, Росс и «слепой» ствол № 6. Ствол Ятес с размерами сечения 8,4x4,7 м реконструируется с заменой деревянной крепи на металлическую (рис. 4.21). В стволах Росс и № 6 навешиваются клетевые подъемы (рис. 4.22), в них также будут размещены отделения для аварийного выхода людей, труб и противовесов подъемных установок. Предусмотрена замена устаревшего механического и электрического оборудования. Связь между горизонтами 4850 ф и 8000 ф, кроме вертикальных стволов, осуществляется также наклонными туннелями.

Шахта имеет большое количество подземных камер – помещений для размещения различных вспомогательных систем, расположенных на глубинах до 2100 м. Эти камеры размерами 20x10x50 м поддерживаются, в основном, обычными видами крепи, такими, как анкерные болты или набрызгбетон, и могут принять лаборатории на нескольких глубинах, что потребует закрытия неиспользуемой части старой шахты и строительства новых полостей для размещения научного оборудования. Достоинством исполь-

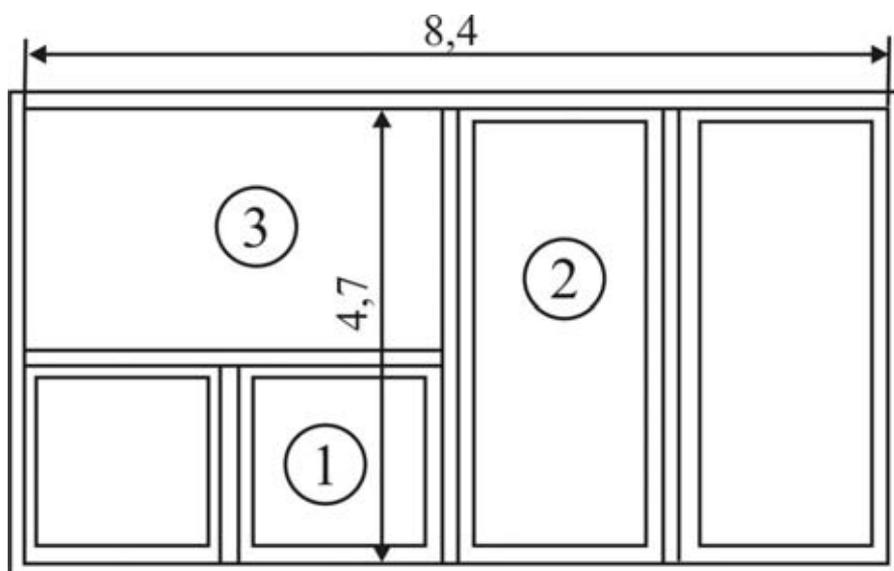


Рис. 4.21. Сечение ствола Ятес после реконструкции

1 – скиповое отделение; 2 – клетевое отделение; 3 – вспомогательное отделение

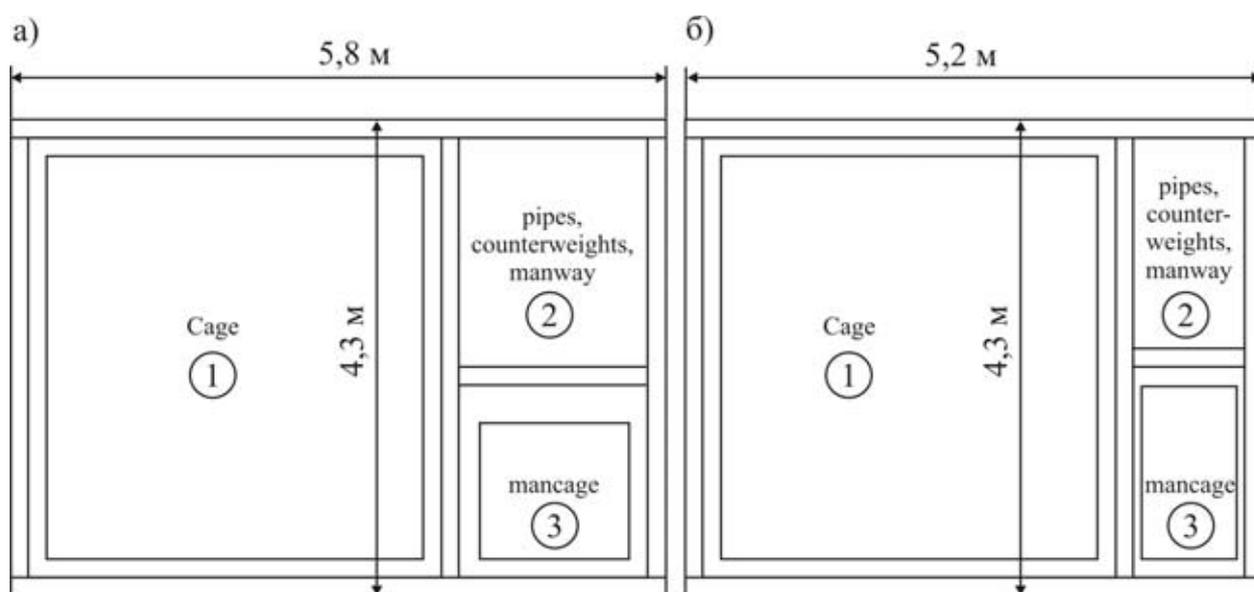


Рис. 4.22. Сечения стволов Росс и №6 после реконструкции

а – сечение ствола Росс; б – сечение ствола №6; 1 – главная клеть; 2 – отделение для труб, противовеса подъемной установки и выхода людей; 3 – аварийная людская клеть

зования существующей шахты для создания лаборатории является наличие развитой сети ее инфраструктуры, включающей электро- и водоснабжение, вентиляцию, откачку подземной воды, кондиционирование воздуха, аварийные выходы. Наибольшая в США глубина расположения физических приборов, возможности их установки на разных

уровнях, высокая устойчивость горных пород, позволяющая сооружать полости больших размеров сделали Хоумстейк идеальным местом для национальной лаборатории наук о Земле.

Помещения лаборатории будут расположены на двух главных горизонтах 4850 ф и 7900 ф. Последний – максимально достигнутый «слепым» стволом № 4, предназначенным для грузоподъемных операций и аварийного выхода людей. Здесь располагается одна из лабораторий, требующая особенно большой мощности толщи покрывающих пород.

На гор. 4850 ф, имеющем весьма высокую устойчивость пород и два ствола с непосредственным выходом на поверхность, сооружается вторая из лабораторий, предназначенная для исследований, при которых мощность выше лежащих пород достаточна для обеспечения чистоты опытов (рис. 4.23; 4.24). На рис. 4.25 показано сооружение бака детектора, наполняемого перхлорэтаном для обнаружения элементарных частиц и устанавливаемого на этом горизонте. Емкость бака около 380 м^3 , диаметр 6 м и длина около 15 м. Варианты размещения исследовательских комплексов на гор. 4850 ф и 7400 ф показаны на рис. 4.26; 4.27.

Полости, где устанавливается физическое оборудование, достигают сечений 20x20 м, 30x8 м, 29x18 м и длины 40...80 м, протяженные выработки – сечений 3x3 м, при арочной форме 4,5x3,6 м. Здесь же в дальнейшем намечается размещение так называемого мегадетектора, строительство которого потребует больших проходческих и монтажных работ с использованием подъемных установок стволов Росс и Ятес.

Как уже указывалось, устойчивость пород шахты Хоумстейк достаточно высока, однако, в целях безопасности для крепления протяженных выработок и полостей используются анкерная крепь различной конструкции и набрызг-бетон с металлической сеткой (рис. 4.28 цв. вкл.). Большие

сечения требуют индивидуального подхода к выбору крепи.

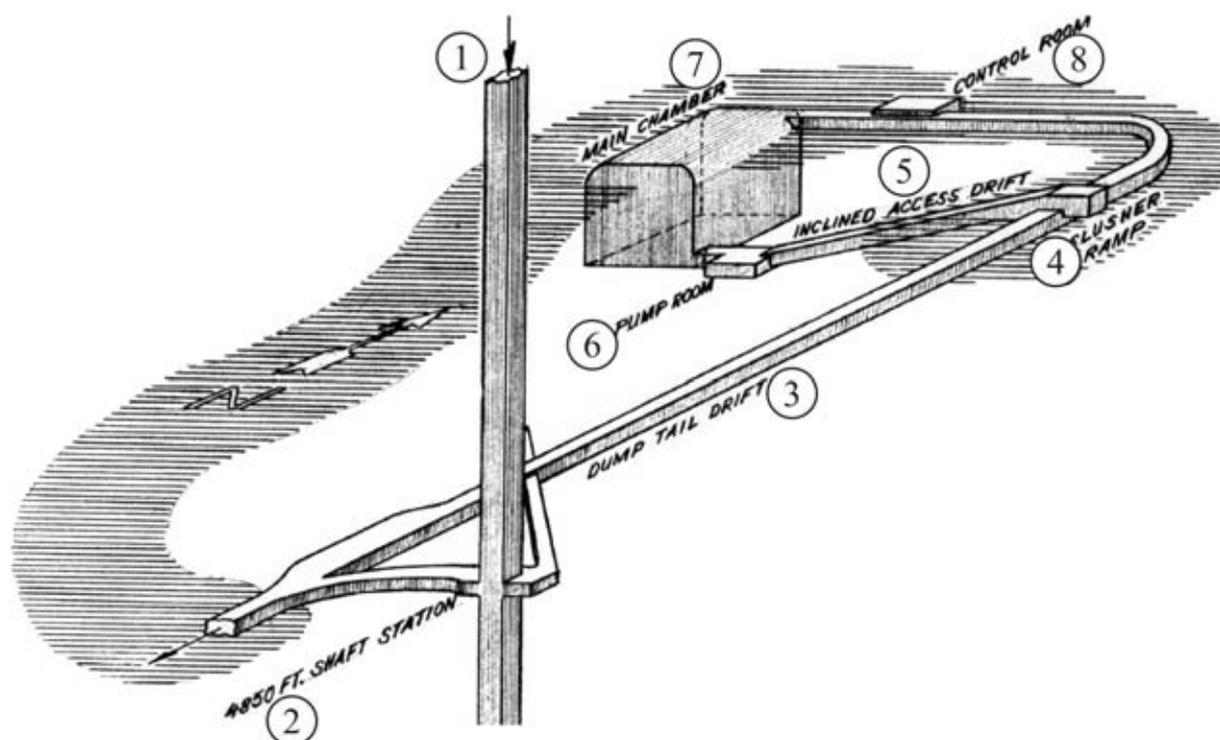


Рис. 4.23. Схема подземной нейтринной лаборатории на горизонте 4850 футов

1 – ствол Ятес; 2 – околоствольный двор гор. 4850 ф.; 3 – главный туннель горизонта; 4 – приемно-отправительная площадка наклонного туннеля; 5 – наклонный туннель; 6 – насосная станция; 7 – главная камера с сосудом перхлорэтана; 8 – камера контрольного оборудования

Карлсбадская подземная национальная лаборатория (Carlsbad Underground National Laboratory) располагается в комплексе горных выработок хранилища радиоактивных отходов ВИПП (WIPP-Waste Isolation Pilot Plant) штат Нью-Мексико, США (см. гл. 3). Лаборатория представляет собой комплекс поверхностных и подземных сооружений, включающих, кроме научных структур, подземные, транспортные и вентиляционные системы. Поскольку подземный комплекс расположен в соляном слое, не требуется никаких специальных устройств по откачке воды – приток воды отсутствует.

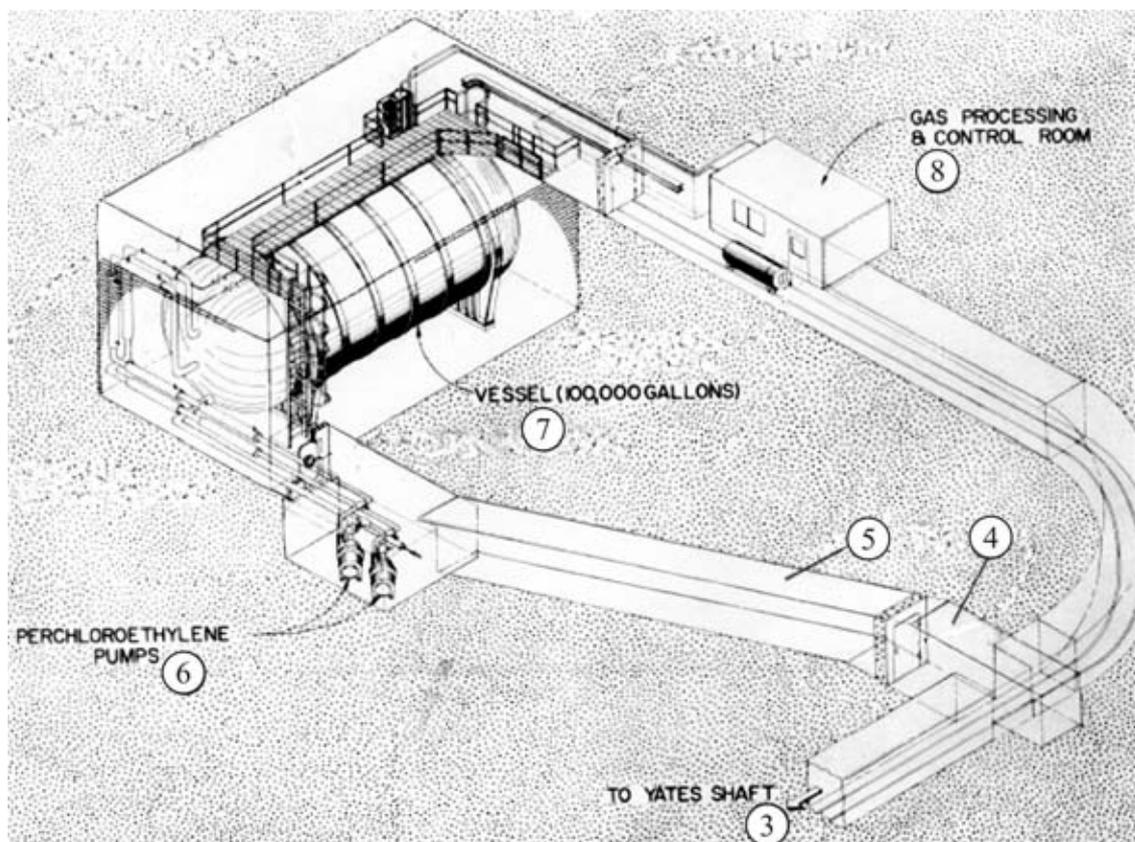


Рис. 4.24. Исследовательский комплекс
нумерация позиций соответствует рис. 4.23



Рис. 4.25. Монтаж сосуда для перхлорэтилена

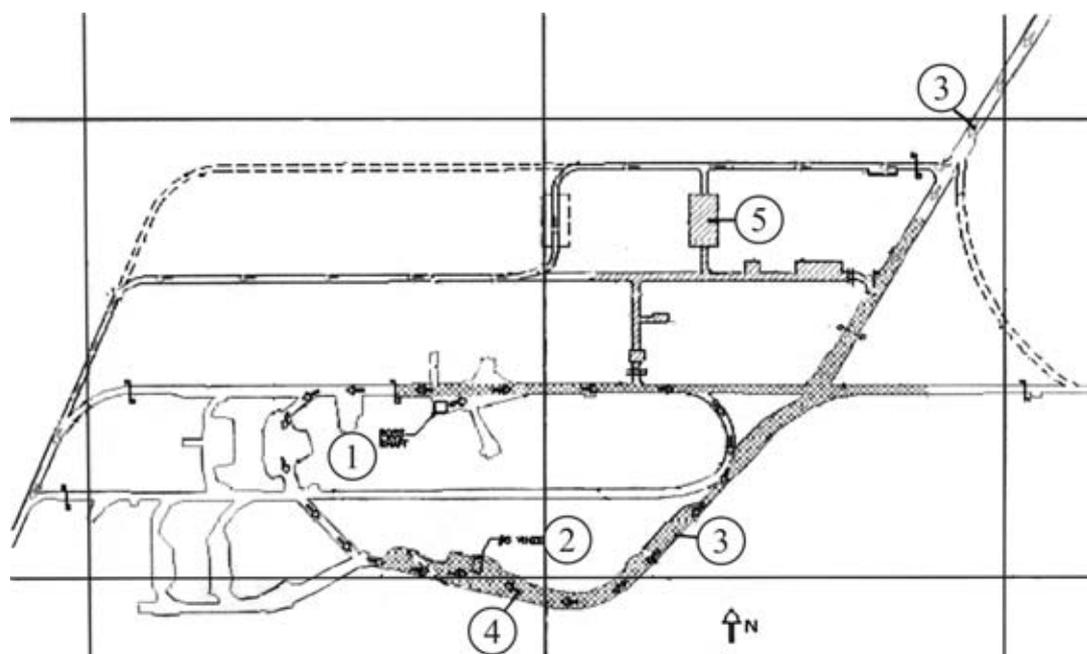


Рис. 4.26. Вариант размещения лабораторного комплекса на горизонте 4850 ф

1 – ствол Росс; 2 – ствол №6; 3 – расширяемые выработки; 4 - новые выработки и камеры

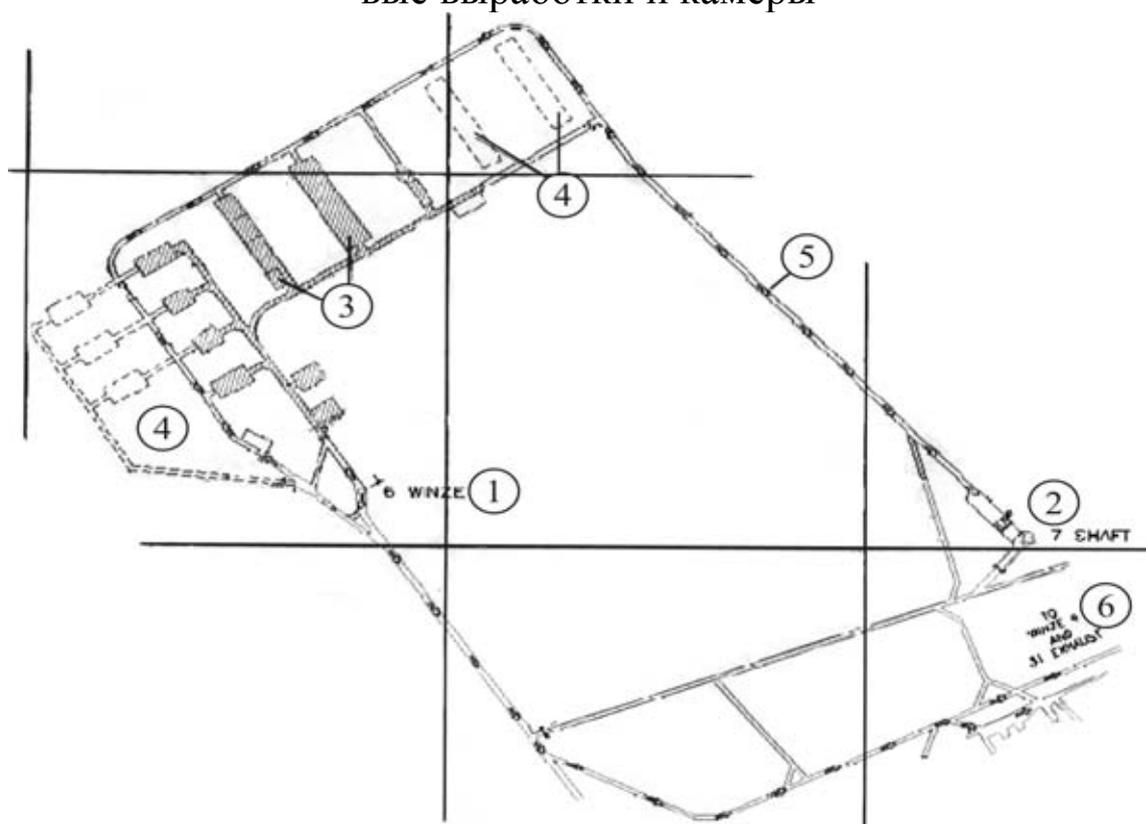


Рис. 4.27. Вариант размещения лабораторного комплекса на горизонте 7400 ф

1 – ствол №6; 2 – ствол №7; 3 – новые выработки и камеры; 4 – перспективные выработки и камеры; 5 – существующие выработки; 6 – направление к стволам

Комплекс лаборатории включает в себя три фазы (рис. 4.29; 4.30):

- первая расположена на горизонте существующего хранилища радиоактивных отходов;

- вторая включает в себя два наклонных туннеля, проводимых с горизонта хранилища (глубина 655 м) до горизонта 700 м. К этим туннелям будут примыкать три полости с размерами сечения каждой 15x10 м и длиной 100 м, которые связаны подводными туннелями с размерами сечения 6x6 м;

- на третьей предусматривается проходка вертикального ствола с поверхности до глубины 1300 м диаметром 5,1 м, связанного с лабораторией гор. 700 м, «слепого» ствола между горизонтами 700 м и 1300 м и строительство экспериментального зала на гор. 1300 м.

Национальная подземная научная лаборатория Сан-Джасинто (San Jacinto National Underground Science Laboratory) будет расположена к востоку от Палм Спрингс (Palm Springs), Калифорния, в горном кряже Сан-Джансинто – одном из самых крутых и высоких в США. Необычная геологическая форма кряжа позволяет с помощью горизонтальной выработки сравнительно небольшой длины обеспечить значительную толщу (до 2,5 км) твердых пород, покрывающих туннель. Горизонтальные выработки, создающие подход к подземной лаборатории, всегда более предпочтительны, чем вертикальные, с точки зрения технологии их проходки, конструкции и стоимости крепи, доставки крупногабаритного оборудования, производительности транспорта.

Одним из преимуществ расположения лаборатории в этом районе является возможность выбора глубины ее расположения, необходимой для изоляции от потока космических лучей. Длина туннеля при разных вариантах глубины колеблется от 4,6 км до 7,6 км, а мощность толщи покрывающих пород от 2,5 км до 3,2 км. Более предпочтительной

была признана длина туннеля 7,6 км, позволяющая обеспечить наибольшую глубину расположения лаборатории. На рис. 4.31 (цв. вкл.), 4.32 (цв. вкл.) показано направление туннеля. Геологический разрез по трассе туннеля см. рис. 4.33 (цв. вкл.), профиль горного гребня – рис. 4.34 (цв. вкл.).

Рассматривались также варианты количества туннелей, обеспечивающих доступ к лабораторному комплексу (рис. 4.35):

- один туннель с продольной пожароустойчивой железобетонной перегородкой толщиной 0,6 м, разделяющей его на грузовое и людское отделения (рис. 4.35 а) с радиусом буровой туннельной машины 4,5 м;

- два параллельных туннеля с радиусом буровой туннельной машины 4,1 м (рис. 4.35 б).

В случае единого туннеля, разделенного перегородкой, он должен использоваться для всех операций – грузового и людского транспорта, подачи свежей и вывода исходящей струи воздуха соответственно по людскому и транспортному отделениям, вывода дыма при пожаре, размещения инженерных коммуникаций. Каждые 500 м на расширенных участках туннеля в перегородке должны устанавливаться герметические двери с тамбуром.

Достоинства единого туннеля – его меньшая стоимость по сравнению с двумя параллельными.

Недостатками являются:

- возможные утечки воздуха через двери, соединяющие два отделения туннеля;

- снижение транспортных возможностей при встречном движении средств грузового транспорта;

- полное блокирование движения транспорта в туннеле при возникновении в нем аварийной ситуации;

- расположение всех инженерных коммуникаций в одном туннеле;

- ограниченные транспортные возможности при реконструкции или расширении лабораторного комплекса.

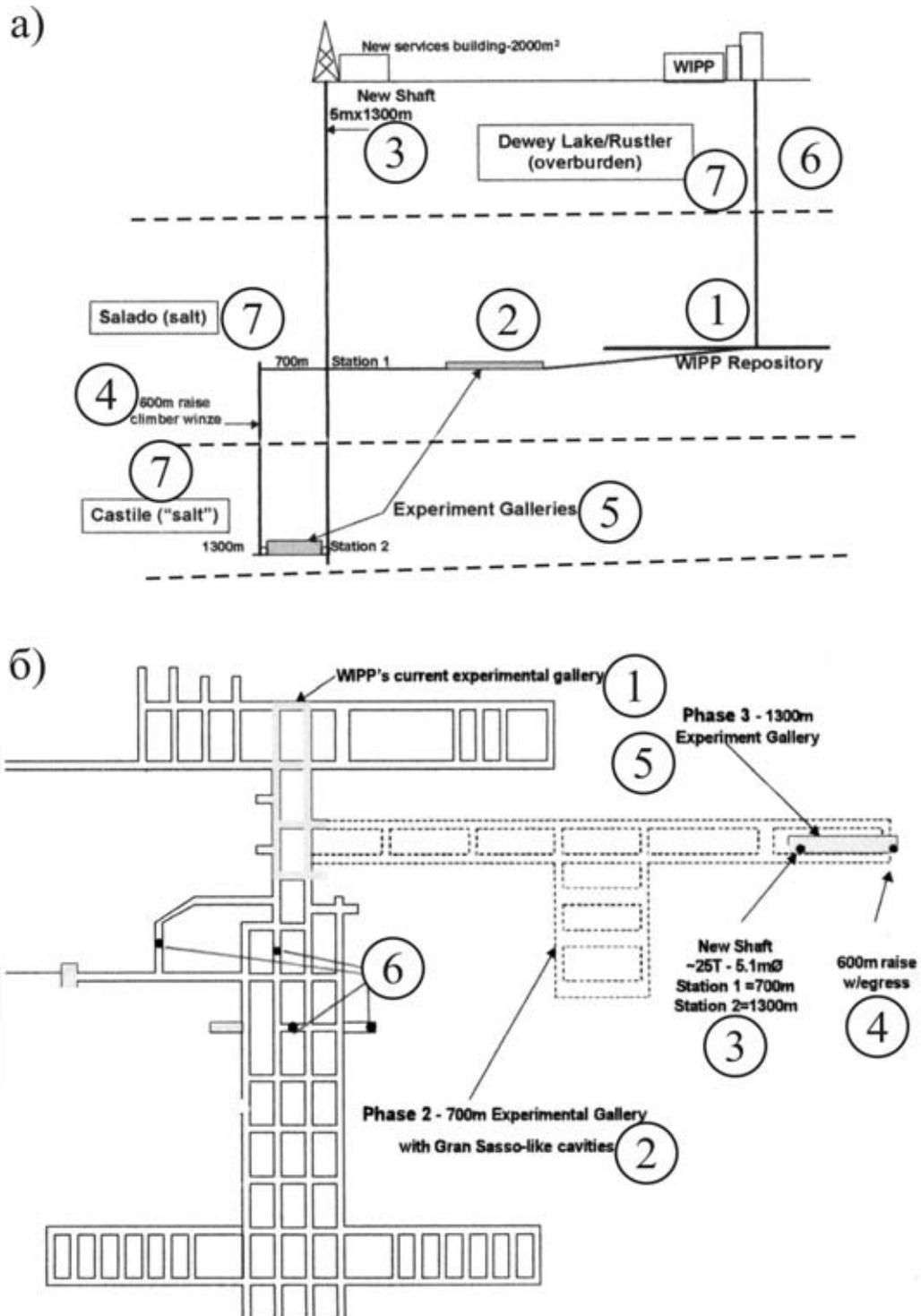


Рис. 4.29. Схемы расположения исследовательских комплексов Карлсбадской национальной лаборатории

а – вертикальная схема; б – план; 1 – горизонт хранилища радиоактивных отходов (1-я фаза лабораторного комплекса); 2 – горизонт 700 м (2-я фаза); 3 – новый ствол на горизонт 1300 м (3-я фаза); 4 – «слепой» ствол с горизонта 700 м на горизонт 1300 м (3-я фаза); 5 – экспериментальные туннели; 6 – вертикальные стволы хранилища радиоактивных отходов; 7 – геологические формации

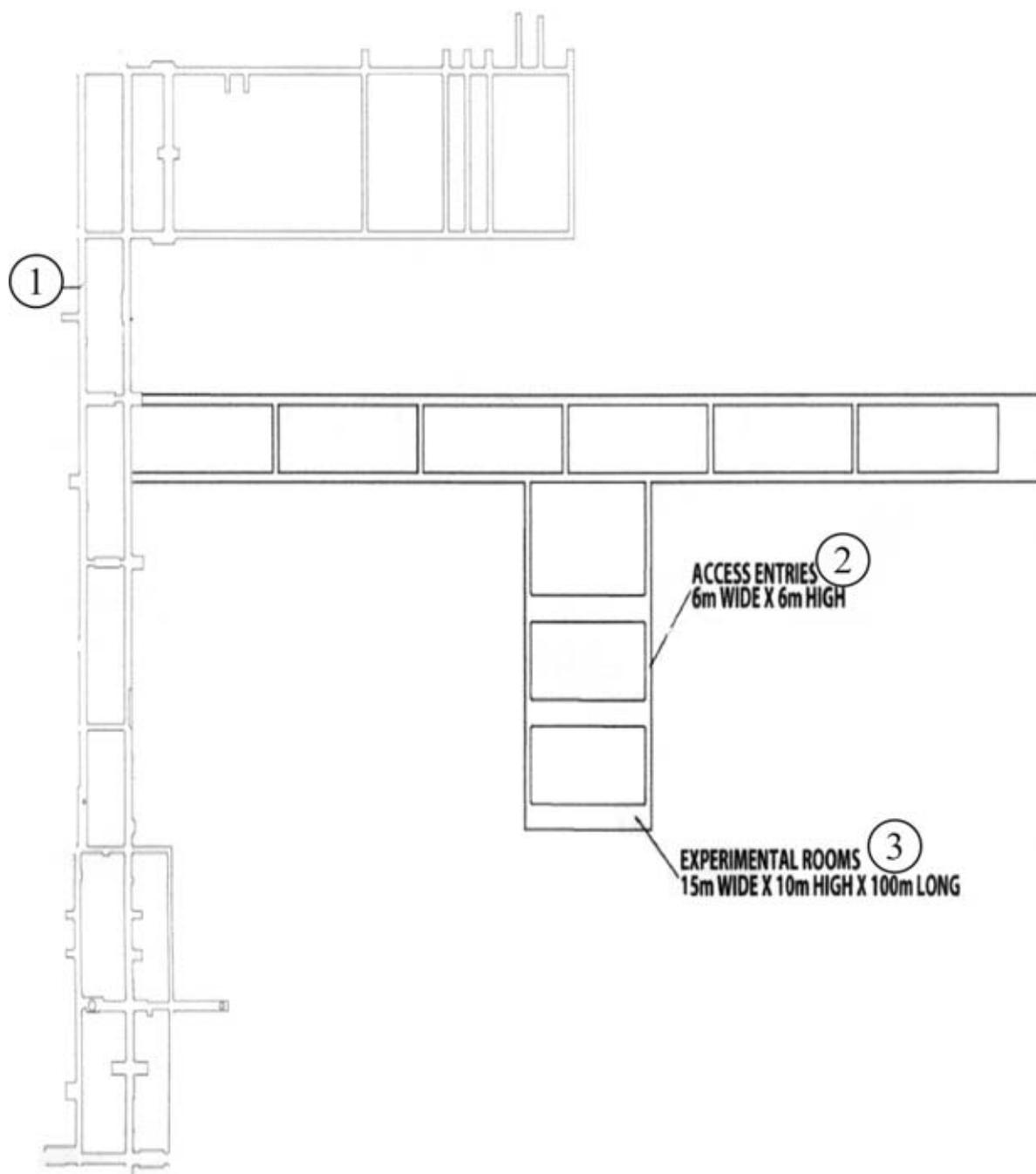


Рис. 4.30. План горных выработок на гор. 700 м – 2-я фаза комплекса лаборатории

1 – 1-я фаза комплекса лаборатории (существующая); 2 – подводящие туннели 2-ой фазы; 3 – полости - экспериментальные залы 2-ой фазы

Два отдельных туннеля требуют соединений через каждые 500 м и стоят дороже, чем один, но у них есть следующие преимущества:

- отдельные подача и вывод воздуха;

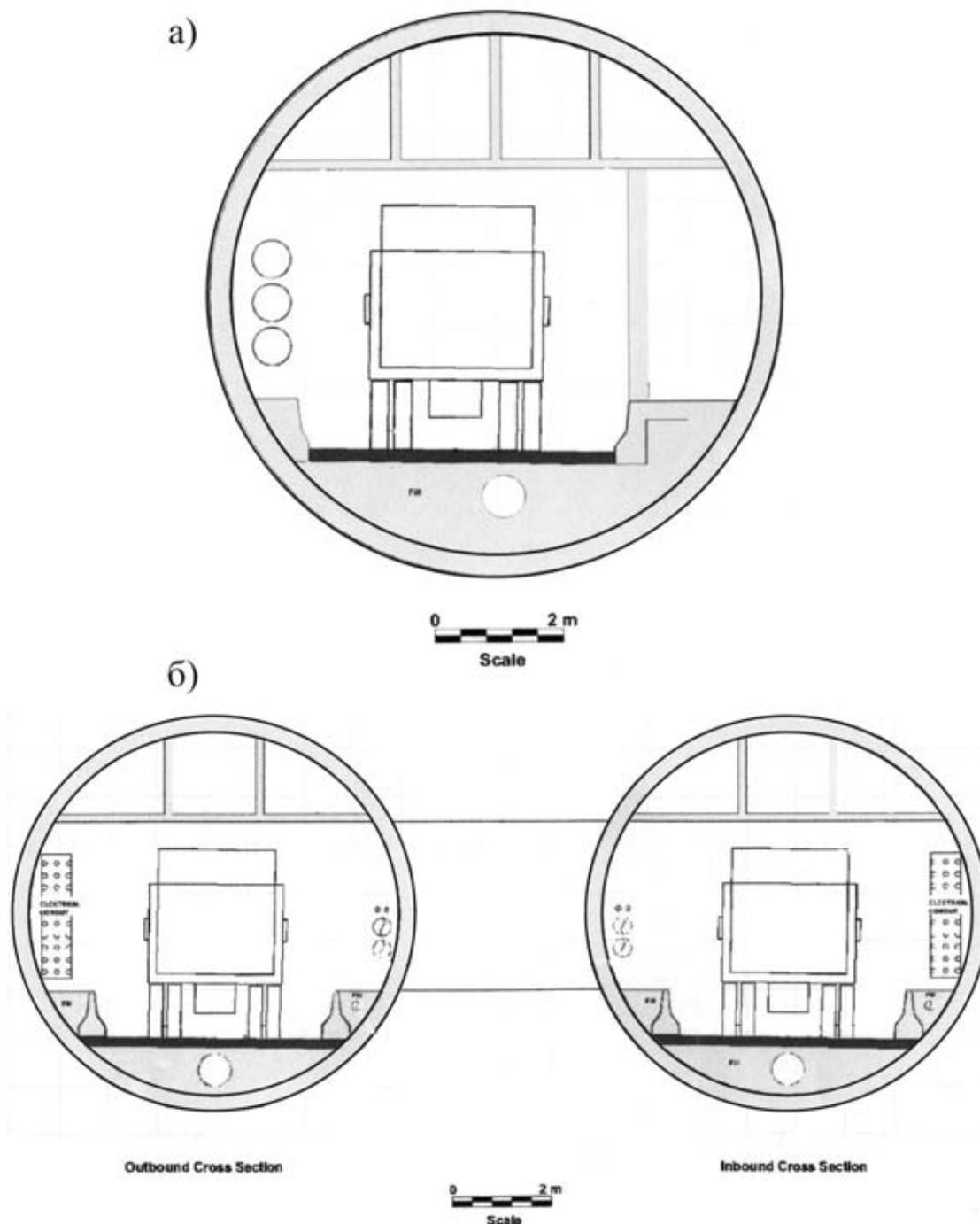


Рис. 4.35. Сечения туннелей, подводющих к научной лаборатории

а – вариант одиночного туннеля; б – вариант сдвоенных туннелей

- обеспечение двух отдельных грузопотоков в противоположных направлениях;
- наличие запасного выхода по одному из туннелей в случае аварии в другом;
- прокладка сетей коммуникаций в разных туннелях.

Выбор варианта количества туннелей будет сделан при дальнейшем проектировании.

Для определения состава и объема помещений лаборатории были рассмотрены следующие решения (рис. 4.36):

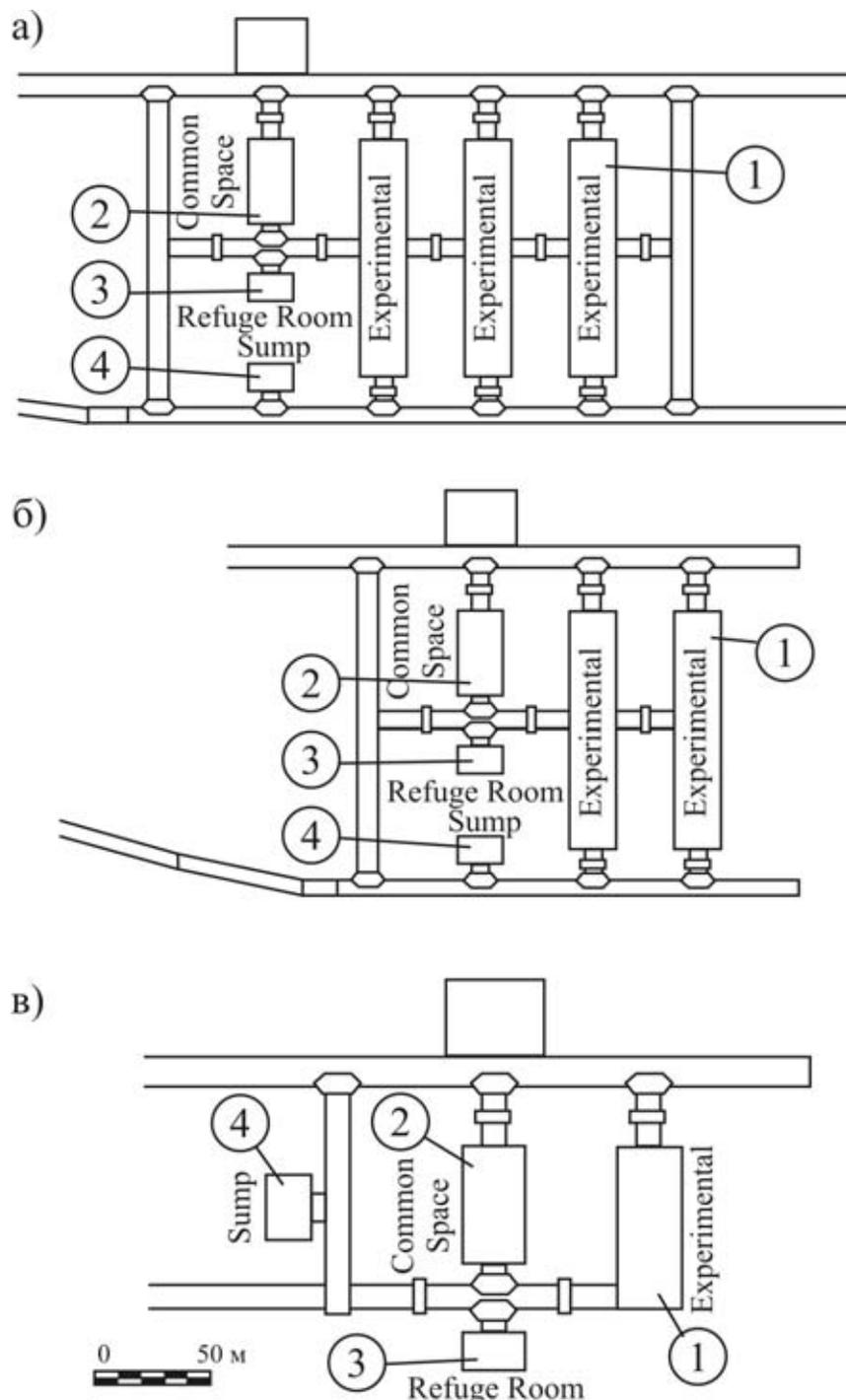


Рис. 4.36. Варианты лабораторного комплекса

а – большой комплекс; б – средний комплекс; в – малый комплекс;
 1 – экспериментальное помещение; 2 – общее помещение; 3 – помещение укрытия; 4 – сточный колодец

- большой комплекс, состоящий из трех подобных помещений;
- средний комплекс – две экспериментальных полости размерами 100х20х20 м;
- малый комплекс с одним помещением таких размеров.

Все три варианта включают в себя вспомогательные подземные камеры: гаражно-складскую размерами 23х30х8,5 м, общего назначения 35х20х20 м, укрытия 12х10х10 м, насосную с противопожарным резервуаром таких же размеров.

В качестве основного был принят средний вариант. Макеты лабораторного комплекса показаны на рис. 4.37 (цв. вкл.), 4.38 (цв. вкл.).

4.2 Физические лаборатории стран мира

Обсерватория-лаборатория Камиока (Kamioka Observatory), Япония, была создана в 1995 г. Она расположена на глубине 1000 м в горных выработках закрытой цинковой шахты Мозуми в 300 км западнее Токио. К лаборатории подходит штольня бывшей шахты – туннель длиной примерно 2 км, способный пропустить стандартные трейлеры. Вход (портал) туннеля показан на рис. 4.39 (цв. вкл.). Твердые и стабильные горные породы предотвращают проникновение воды, температура воздуха составляет 14⁰С при относительной влажности 93%.

Лаборатория Камиока состоит из двух комплексов (рис. 4.40 цв. вкл.). Первый из них – Камиоканде (сокращенно KamLAND) начал работать с 1985 г. по наблюдению за нейтронами космического происхождения. В комплекс входит емкость высотой 16 м и диаметром 25,6 м с купольным сводом, которая содержит 3000 т чистой воды и около 1000 фотумножителей, прикрепленных к внутренней поверхности (рис. 4.41-4.43 цв. вкл.). В 1996 г. был запущен в эксплуата-

цию второй, более мощный комплекс Супер-Камиоканде для наблюдения, кроме нейтрино, также и за протонами. Цилиндрическая структура высотой 40 м и диаметром 40 м с купольным сводом содержит 50 тыс. т чистой воды, окруженной около 11000 фотоумножительных труб (рис. 4.44-4.46 цв. вкл.).

Столкновения нейтрино с электронами или ядрами атомов воды могут производить частицы, которые двигаются быстрее, чем скорость света в воде (хотя, конечно, медленнее, чем скорость света в вакууме). Это создает вспышку света – так называемое Черенковское свечение, которое позволяет определить направление и особенности нейтрино.

Физическая лаборатория Пихасалми (Pyhasalmi Laboratory), Пихаярви, Финляндия, расположена в одной из старейших действующих рудных шахт страны (рис. 4.47-4.48 цв. вкл.), которая добывает цинк, медь и пириты – серные и железные колчеданы. После полного развития горных работ на горизонте 1440 м она будет самой глубокой шахтой в Европе. Горные работы на этом горизонте (его называют новой шахтой) начались в 2001 г. и будут продолжаться, по крайней мере, до 2015 г. В старой шахте горные работы прекращены. Рядом с промплощадкой шахты находится карьер глубиной 130 м и длиной несколько сот метров, где добыча руды производилась открытым способом.

В зданиях шахты располагаются наземные лаборатории научного центра, в горных выработках нескольких горизонтов размещены подземные лаборатории различного назначения (рис. 4.49 цв. вкл.).

Горные работы старой шахты достигли горизонта 1050 м (рис. 4.50 цв. вкл.) и были остановлены. Многие ее полости теперь используются для научных целей. Доступ к существующим подземным лабораториям обеспечивается подъемной установкой старого вертикального ствола и автомобилями или самоходными вагонетками через наклонный спиральный туннель.

Для выдачи руды с горизонта 1440 м (новой шахты) будет использоваться новый вертикальный ствол. Наклонный спиральный туннель углубляется до этого горизонта для транспортировки оборудования с габаритными размерами 2,6х2,8х8 м (рис. 4.51 цв. вкл.).

Все полости, используемые для научных целей, обеспечены электричеством и связью, они также снабжаются воздухом и водой. На рис. 4.52 (цв. вкл.) показана привязка лабораторных помещений гор. 1440 м к горным выработкам новой шахты. На рис. 4.53 (цв. вкл.) показано расположение полостей на различных горизонтах старой шахты. Они обычно имеют ширину 3...6 м, высоту 3...5 м, длину 4...16 м. На глубине 660 м возможно использование полости размером 10х8х30 м, на глубине 970 м двух полостей с размерами каждой примерно 7х6х20 м.

В лабораториях, размещенных в описанных полостях, проводятся следующие исследования:

1) измерения радона. Общее количество пунктов таких измерений на разных глубинах равно 40. Эти эксперименты делаются, чтобы выяснить концентрации и передвижение радона в шахте, что важно как для научных, так и здравоохранительных целей;

2) эксперименты с газами глубин земли. Газ поступает через породы к поверхности, и некоторые примеси химических элементов, например, урана, дрейфуют вместе с газом;

3) изучение состава космических лучей. Детекторы для этого размещены на глубинах 210 м, 90 м и на поверхности;

4) исследование так называемой «темной материи»;

5) изучение выделения нейтронов в результате природной радиоактивности горных пород.

Намечается также расширение состава и объема физических исследований. В новой шахте будет сооружена полость для размещения научного оборудования с размерами 15х20х100 м и сопутствующие ей меньшие полости.

Горные работы по добыче руды в новой шахте ведутся

с использованием буровзрывных работ по специальному графику, чтобы не мешать приборам, установленным в шахте.

Температура воздуха на гор. 1440 м равна 23⁰С. Влажность зависит от вентиляции и температуры наружного воздуха. Очень крепкие породы препятствуют притоку воды в выработки.

Подземная лаборатория Балби по исследованию «темной материи» (Boulby Underground Laboratory for Dark Matter research), Лофтус, Великобритания размещается в шахте, единственной в стране и самой глубокой в Европе, добывающей поташ (углекислый калий), который применяется в качестве удобрения в сельском хозяйстве (рис. 4.54 цв. вкл.). Поташ является жизненно важным регулятором роста растений и поэтому необходимо искусственное пополнение им культивируемых почв. Шахта Балби также добывает каменную соль, используемую для предотвращения обмерзания дорог зимой.

Месторождение поташа и соли простирается на расстояние 15 км с севера на юг. Оно было образовано примерно 230 млн. лет назад испарением древнего моря и сосредоточено на глубине 1200...1500 м в пласте мощностью 0...20 м, достигая средней мощности 7 м.

Шахта Балби открыта в 1973 г. и добывает 3 млн. т руды поташа в год, из которой после обогащения вырабатывается около 1 млн. т поташа. Дополнительно добывается около 750 тыс. т каменной соли. Поташ обычно добывается на участках пласта, где его мощность составляет более 4 м. Горные работы на шахте ведутся полную неделю 24 часа в сутки. При этом добыча поташа ведется с понедельника по пятницу, а соли – в субботу и воскресенье. Соль извлекается из слоя, залегающего непосредственно под поташем.

Горные работы в настоящее время ведутся на глубине 1500 м и продвинулись на 7 км под дно Северного моря. Пласт отрабатывается по камерной системе разработки с

оставлением целиков для поддержания кровли. Относительная влажность воздуха в шахте составляет 37%, температура пород – 35⁰С, после охлаждения температура воздуха достигает 28⁰С.

В шахте Балби на глубине 1100 м в 1988 г. была оборудована физическая лаборатория для исследования «темной» материи, которая составляет весьма значительную часть общей материи Вселенной, однако ее природа и свойства еще не выяснены физиками. В выработках шахты установлены детекторы Дрифт (Drift) и Зеplin (Zeplin) (рис. 4.55-4.58 цв. вкл.). Расположение оборудования под землей позволило уменьшить фоновый поток космических лучей в 106 раз.

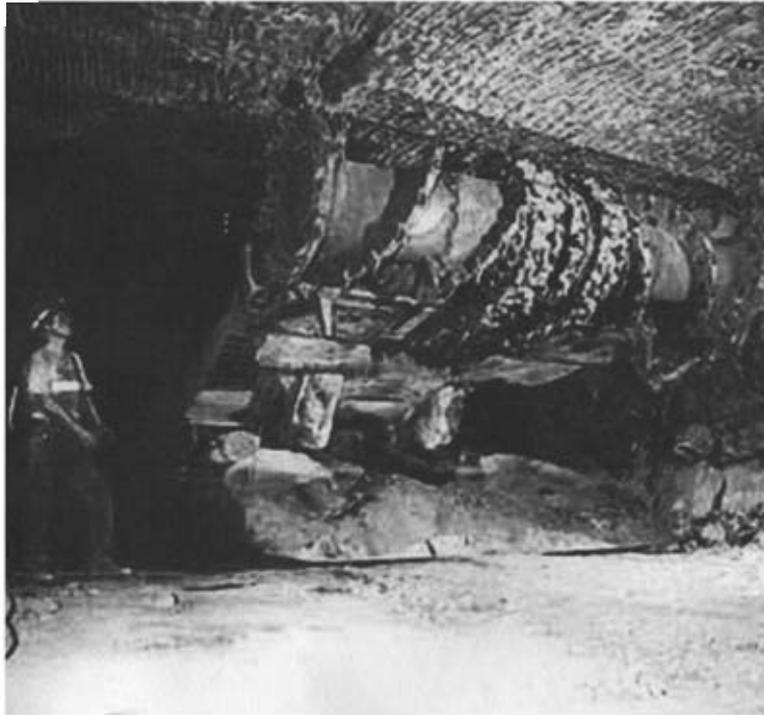
Первоначальная площадь установки исследовательского оборудования составляла 300 м², сейчас она выросла до 2500 м², на ней расположены, кроме основного оборудования, подсобные помещения, компьютерная техника, склады.

На рис. 4.59 (цв. вкл.) показано сопряжение ствола шахты с подводящей выработкой, на рис. 4.60 технологические процессы шахты Балби по добыче и транспортировке поташа.

Шахта Балби является примером того, что подземные структуры принципиально отличаются от объектов, расположенных на поверхности. Это отличие заключается в гораздо большей зависимости подземных структур от горно-геологических и гидрогеологических условий. Они влияют как на основные конструктивные решения, так и на способ строительства.

На шахте Балби пласт поташа вскрыт двумя вертикальными стволами диаметром около 5,5 м глубиной 1150 м, пройденными в 1968-74 гг. На одном из участков стволы пересекли водоносные песчаники, в которых содержалась соленая вода под большим давлением, что потребовало применения их замораживания и цементации (рис. 4.61;

а)



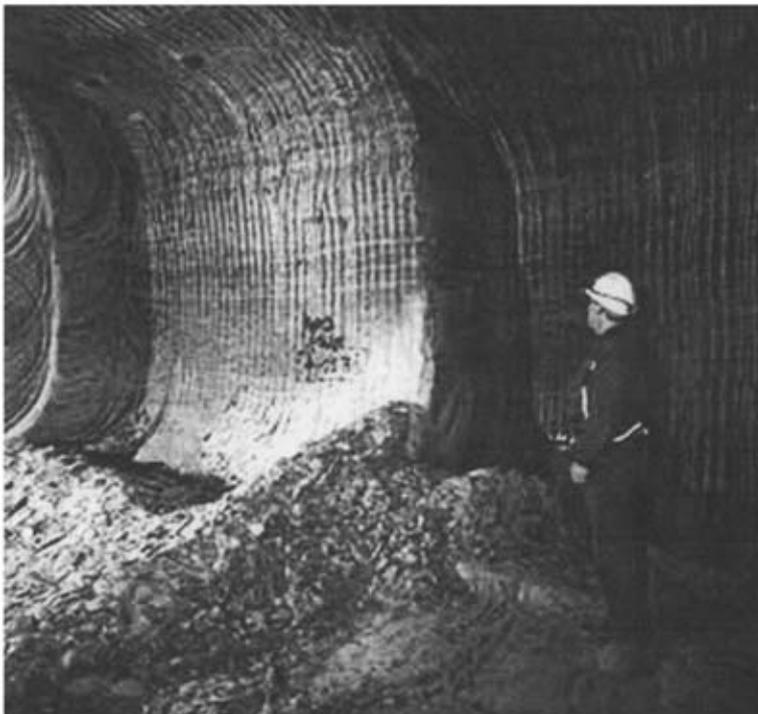
б)



Рис. 4.60. Технологические процессы шахты Балби

а – комбайновая выемка поташа; б – бурение скважин для установки анкерной крепи; в - общий вид выемочной полости; г – целики, оставляемые между выемочными камерами для поддержания кровли; д – транспортировка поташа самоходными вагонетками по участковым выработкам; е – конвейерная транспортировка поташа по магистральной выработке

В)



Г)



Рис. 4.60 (Продолжение)

д)



е)



Рис. 4.60 (Окончание)

4.62). Нижние части стволов закреплены монолитным железобетоном и усилены металлическими стержнями, подвешенными к опорному венцу средней части ствола. Зазор между крепью и породой заполнялся полиуретановой пеной.

Несмотря на усиление крепи в описанной зоне, всего через 2 года в крепи появилась трещина, а за десятилетия крепь была так повреждена, что понадобилась ее замена. Работы по ремонту выполнялись в 1983-85 гг. в скиповом

стволе и в 1985-86 гг. в клетевом. При ремонте крепи обоих стволов были приняты следующие решения.

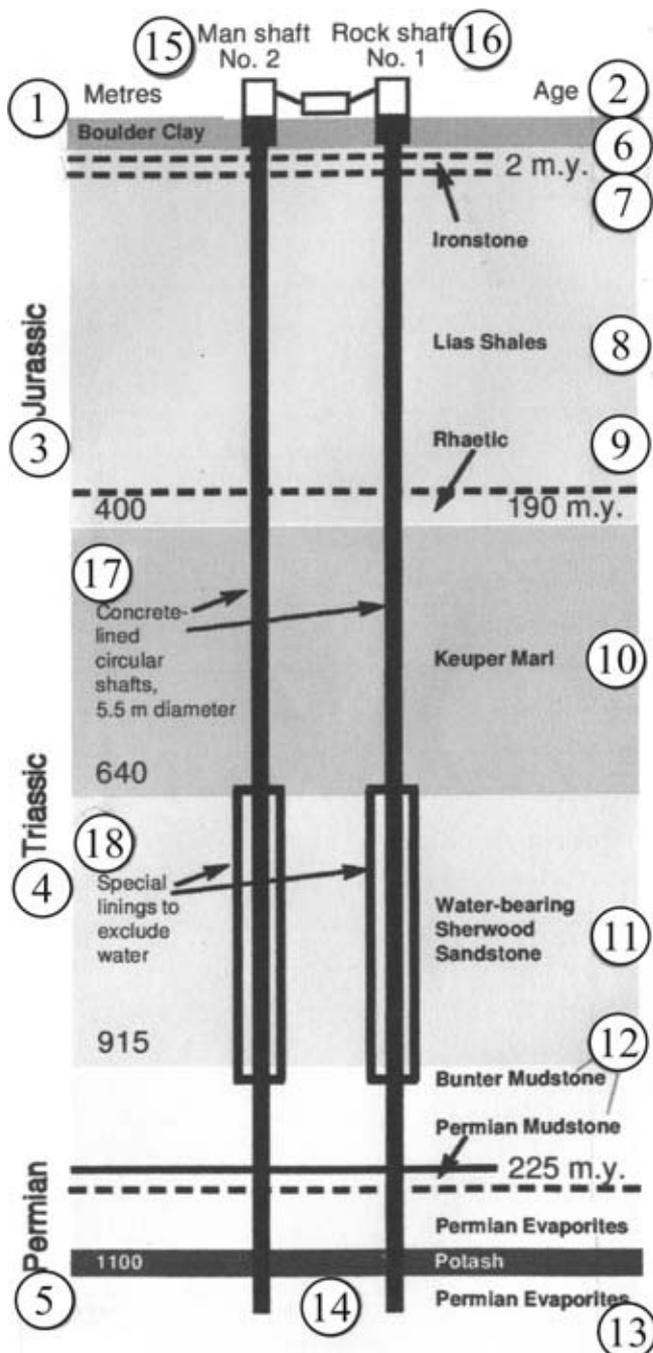


Рис. 4.61. Геологический разрез по шахтным стволам

1 – глубина, м; 2 – возраст, млн. лет; 3 – юрский период; 4 – триасовый период; 5 – пермский период; 6 – глина с включениями булыжника; 7 – включения крепких пород; 8 – глинистый сланец; 9 – рэгский ярус триасового периода; 10 – мергель; 11 – водонесущий песчаник; 12 – аргиллит; 13 – пермские отложения; 14 – пласт поташа; 15 – клетевой ствол; 16 – скиповой ствол; 17 – бетонная крепь; 18 – специальная крепь, исключая поступление воды в ствол

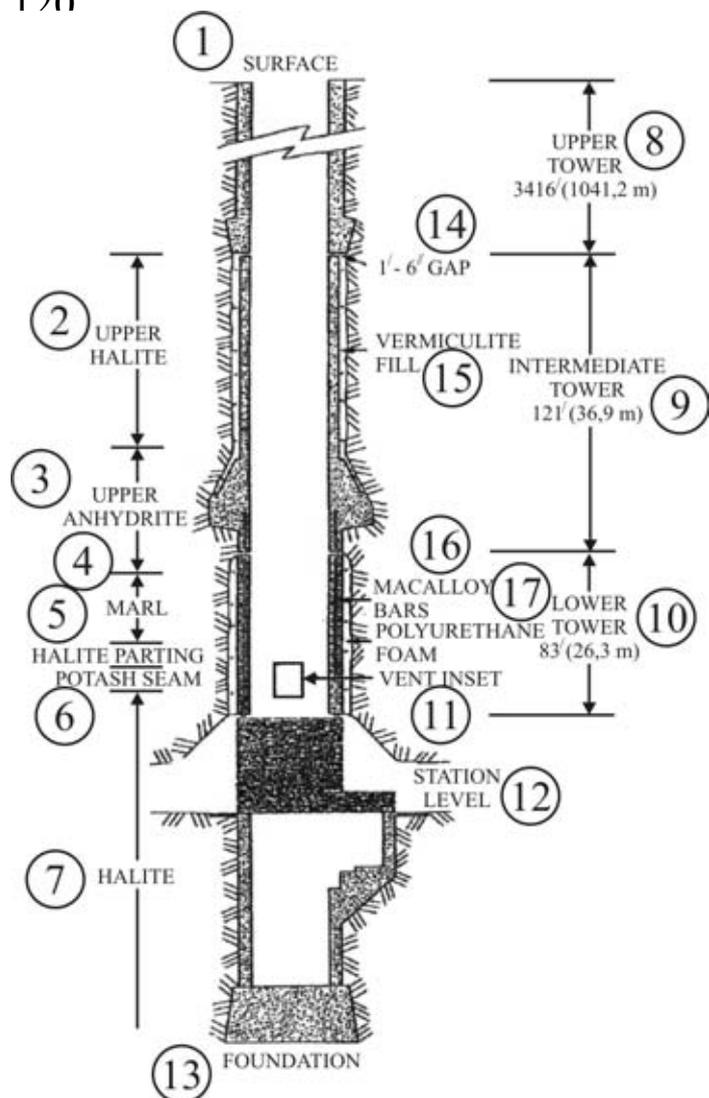


Рис. 4.62. Крепь ствола, установленная при его проходке

1 – поверхность шахты; 2 – верхний пласт каменной соли; 3 – верхний пласт ангидрита; 4 – мергель; 5 – прослойки соли; 6 – пласт поташа; 7 – пласт соли; 8 – верхняя часть ствола; 9 – средняя часть ствола; 10 – нижняя часть ствола; 11 – вентиляционная рассечка; 12 – сопряжение ствола с выработками шахты; 13 – фундамент; 14 – зазор; 15 – заполнение легким бетоном; 16 – металлические стержни; 17 – полиуретановая пена

По периметру ствола укладывалось кольцо из 36 (в клетевом стволе) или 32 (в скиповом стволе) бетонных блоков толщиной 1067 мм и высотой 610 мм, весом 1 т, подвешенных на продольных стержнях за кольцевые стальные платформы (рис. 4.63). Жесткость системы крепи из бетонных блоков обеспечивалась эпоксидной смолой в вертикальных швах и цементным раствором в горизонтальных швах. Цемент закачивался также в зазор между блоками и породой.

Дальнейшая эксплуатация стволов показала недостаточность принятых решений по ремонту крепи. В начале 1996 г. замененная крепь на участке пересечения мергеля обоими стволами была снова так деформирована, что потребовалась еще одна ее замена. На рис. 4.64 показаны раз-

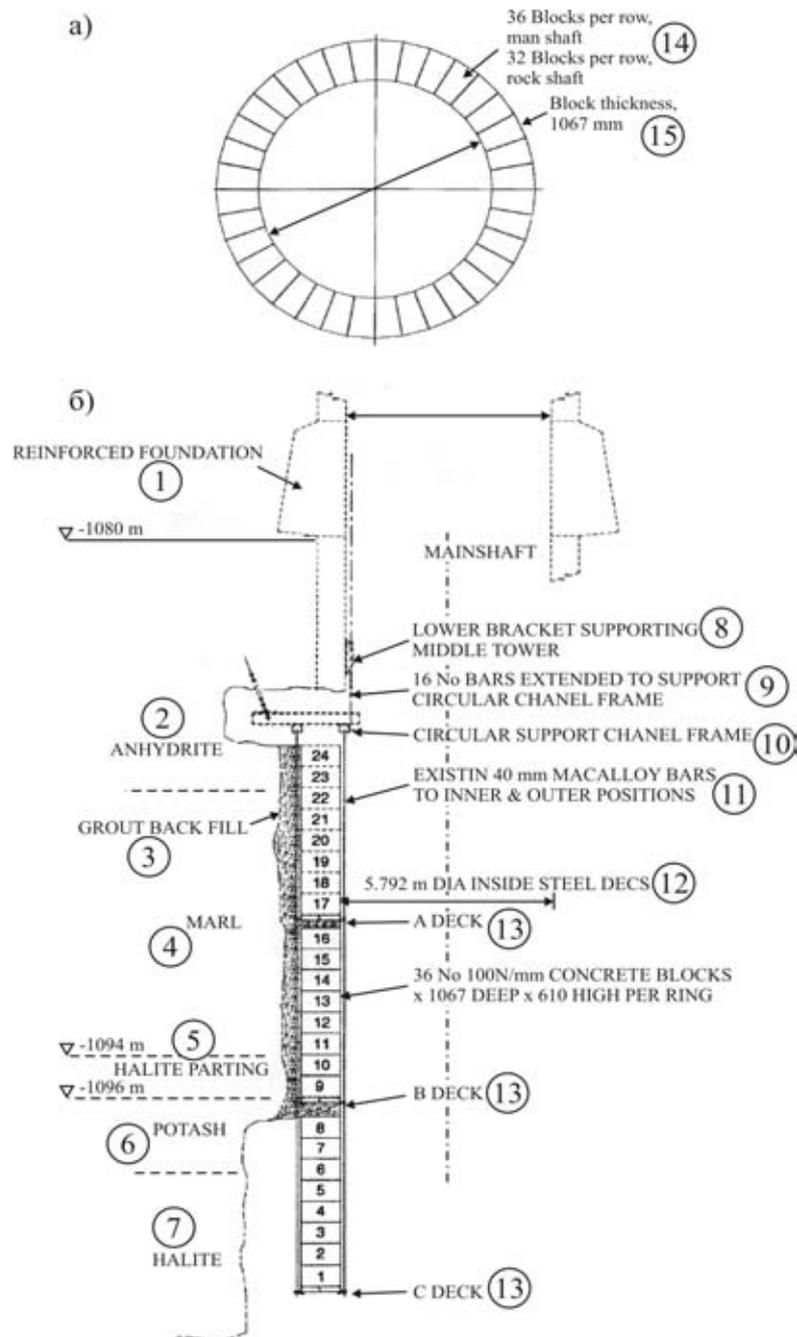


Рис .4.63. Первая реконструкция крепи нижней части клетового ствола

а – поперечное сечение ствола; б – продольный разрез по стволу; 1 – опорный венец средней части ствола; 2 - ангидрит; 3 – цементация закрепного пространства; 4 – мергель; 5 – прослойка соли; 6 – пласт поташа; 7 – пласт соли; 8 - нижняя скоба средней части ствола; 9 – стержни, удерживающие кольцевую раму; 10 – кольцевая поддерживающая рама; 11 – существующие стержни внутреннего и наружного расположения; 12 – внутренний диаметр стальных платформ; 13 – стальные платформы; 14 – 36 блоков в ряду в клетовом стволе, 32 блока в ряду в скиповом стволе; 15 – толщина блоков – 1067 мм

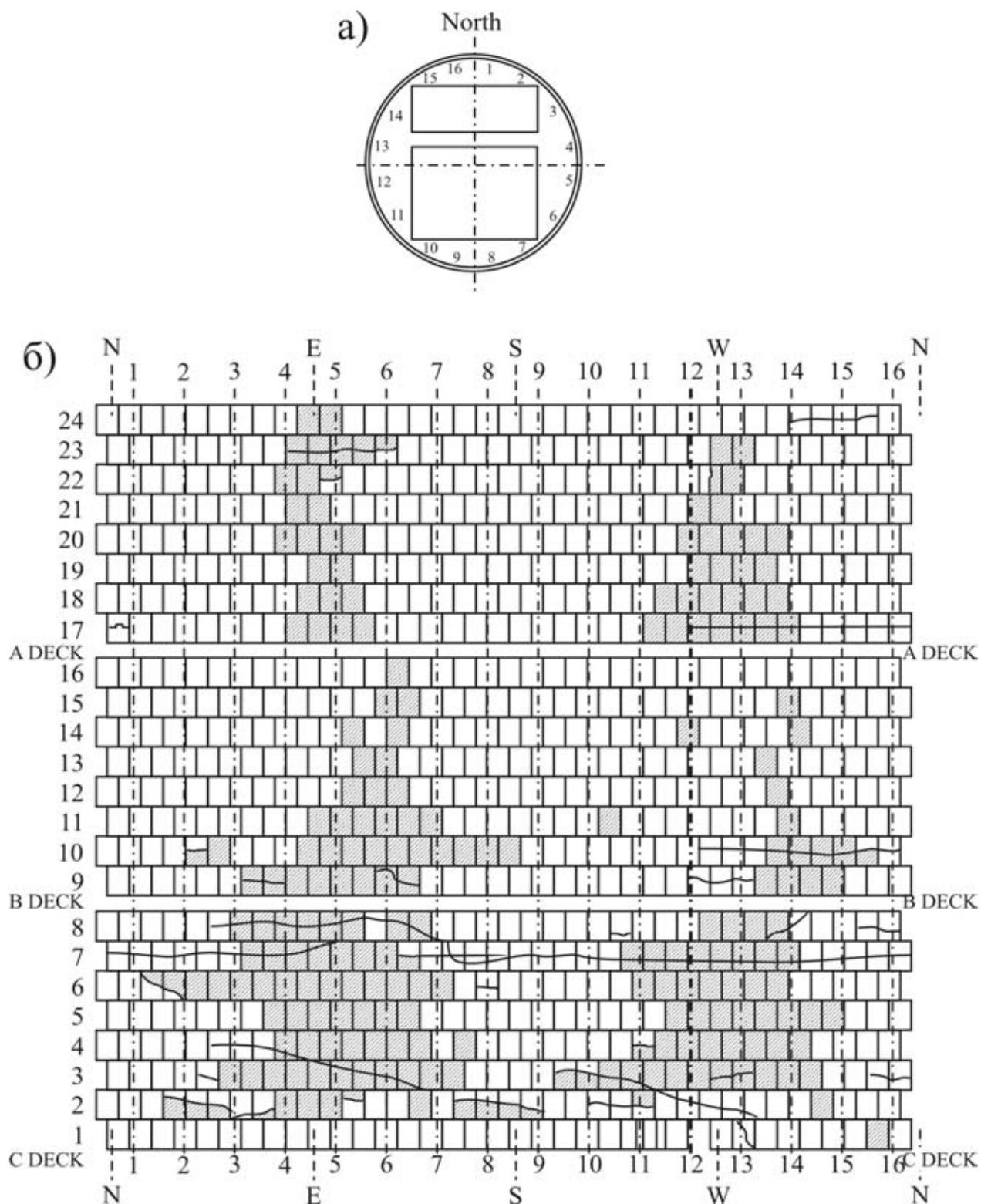


Рис. 4.64. Разрушение крепи нижней части клетевго ствола после первой реконструкции

а – сечение ствола с расположением металлических стержней; б – развертка крепи. Волнистая линия – трещины в блоках, заштрихованные участки – зоны раскрытых швов, расслоения и выкрашивания блоков

ные виды ее деформации: растрескивание, расслоение и выкрашивание блоков, раскрытие швов между ними.

Новая крепь в клетевом стволе еще раз была установлена в 1998-99 гг., в скиповом – в 2000-2001 гг. При втором ремонте укладывалось двойное кольцо из 40 высокопрочных блоков, изготовленных из микрокварцевого бетона толщиной 550 мм, высотой 600 мм, весом примерно 0,51 т. Стержни, прикрепленные к забивным балкам, расположенным под опорным венцом средней части ствола, поддерживают стальные платформы, которые в свою очередь несут кольца бетонных блоков (рис. 4.65). В швах между блоками уложена специальная фанера для обеспечения податливости крепи. В зазор между крепью и породами закачивался цементный раствор из портландцемента и золы.

Нейтринная обсерватория Садбэри (Sudbury Neutrino Observatory), Онтарио, Канада, расположена на глубине 2039 м в шахте Крайтон (Creighton), добывающей медную и никелевую руду (рис. 4.66 цв. вкл., 4.67 цв. вкл.). Шахта Крайтон – одна из примерно 20 медно-никелевых шахт, расположенных в уникальной геологической структуре, известной как бассейн Садбэри. Эллиптическая формация размерами 60x27 км – все, что осталось от гораздо большего кратера диаметром примерно 70 км, образовавшегося в Канадском щите около 1,8 млрд. лет назад. Большинство из тех, кто его изучал, считает, что этот кратер – результат падения метеорита размером 1...3 км, врезавшегося в Землю со скоростью 15 км/сек. (рис. 4.68). Взрыв огромной энергии расплавил и испарил часть горных пород, измельчил и разбросал на большой площади другую их часть. Осколки объемом 1...3 м³, упавшие на Землю, сохранились в бассейне до сих пор. В пределах 2...3 млн. лет после удара, дно кратера, глубиной около 20 км, выгнулось эластично пиком в центре, подобно отскочившей дождевой капле, а позднее сжалось, чтобы образовать бассейн Садбэри.

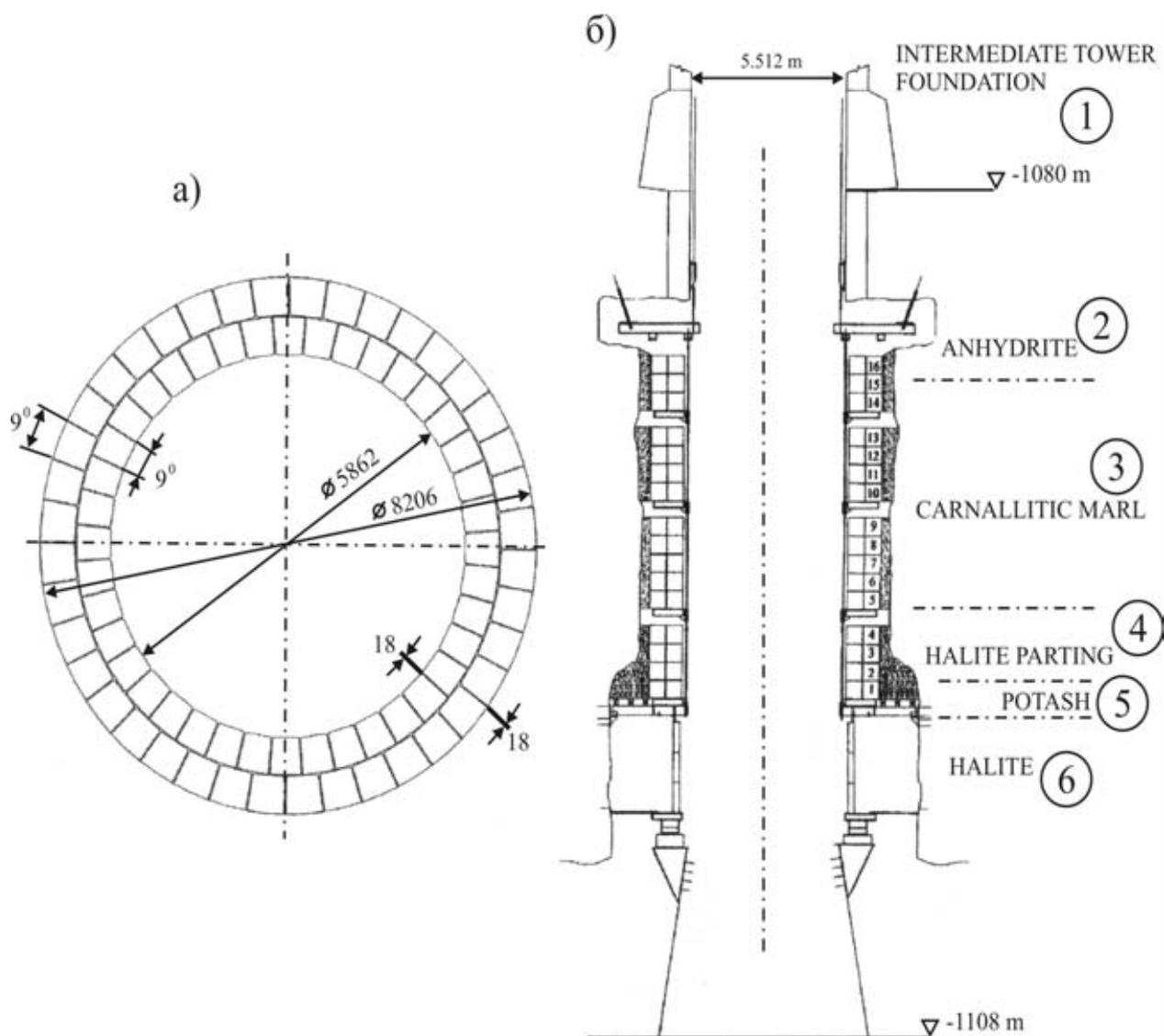


Рис. 4.65. Вторая реконструкция крепи клетового ствола

а – поперечное сечение ствола; б – продольный разрез по стволу; 1 – опорный венец средней части ствола; 2 – ангидрит; 3 – мергель; 4 – прослойки соли; 5 – пласт поташа; 6 – пласт соли

Формирование кратера освободило от горного давления нижележащие породы, богатые никелем и медью, залегающие на много километров ниже точки удара. Как результат, эти породы расплавились и поднялись в кратер, заставив всплыть обломки. Постепенно охлаждаясь, рудное тело сформировалось вдоль границ бассейна. По этим границам сегодня расположены медно-никелевые шахты. В некоторых из них, таких, как Крайтон, рудное тело уходит на обследованную глубину, по крайней мере, 3 км.

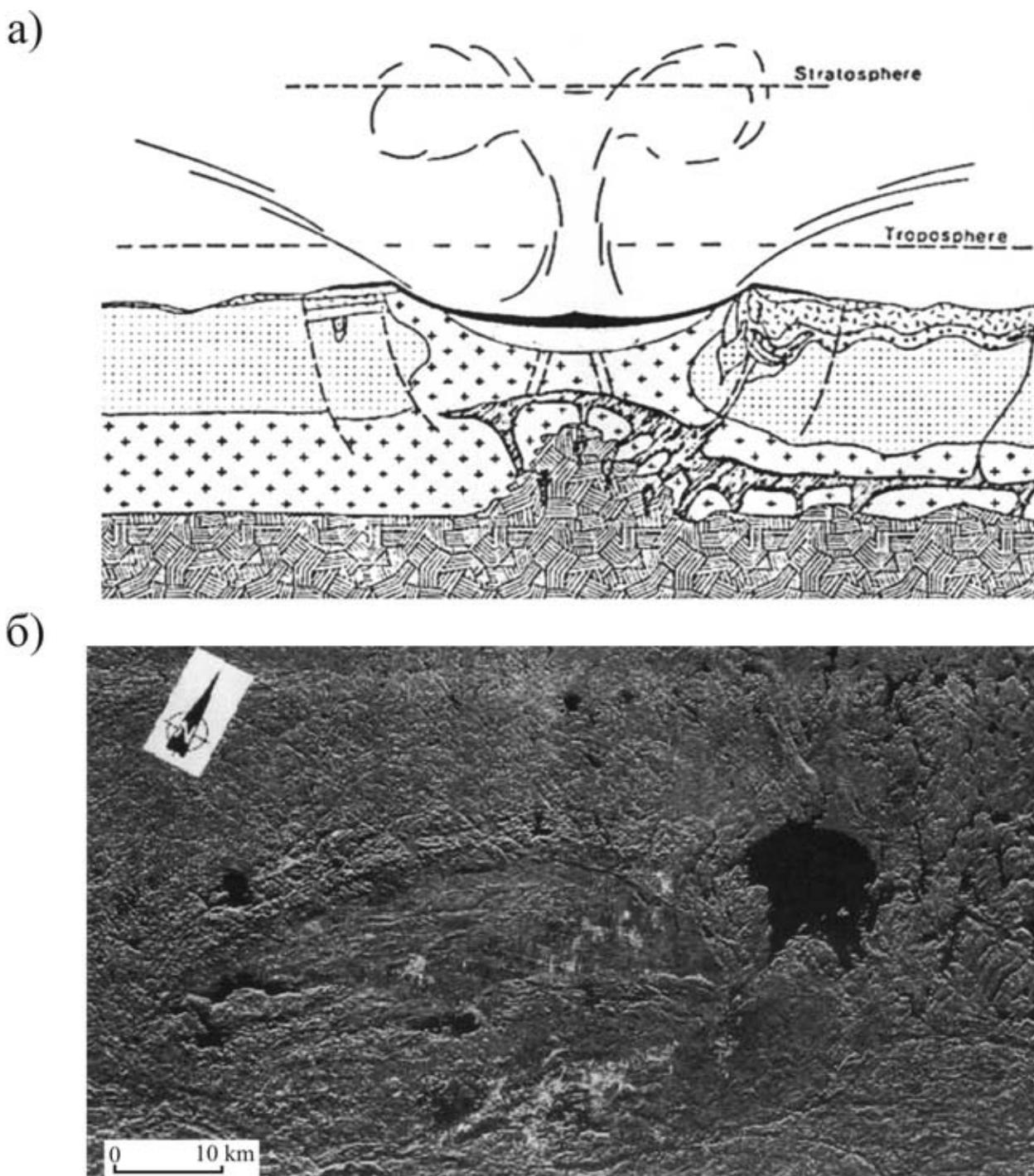


Рис. 4.68. Схема образования месторождения Садбери
 а – образование кратера при ударе метеорита; б – вид со спутника на контуры кратера (справа – озеро Ванапитаи (Wanapitai)), в – план контуров кратера; 1 – город Садбэри; 2 – медно-никелевые шахты; 3 – озеро Ванапитаи

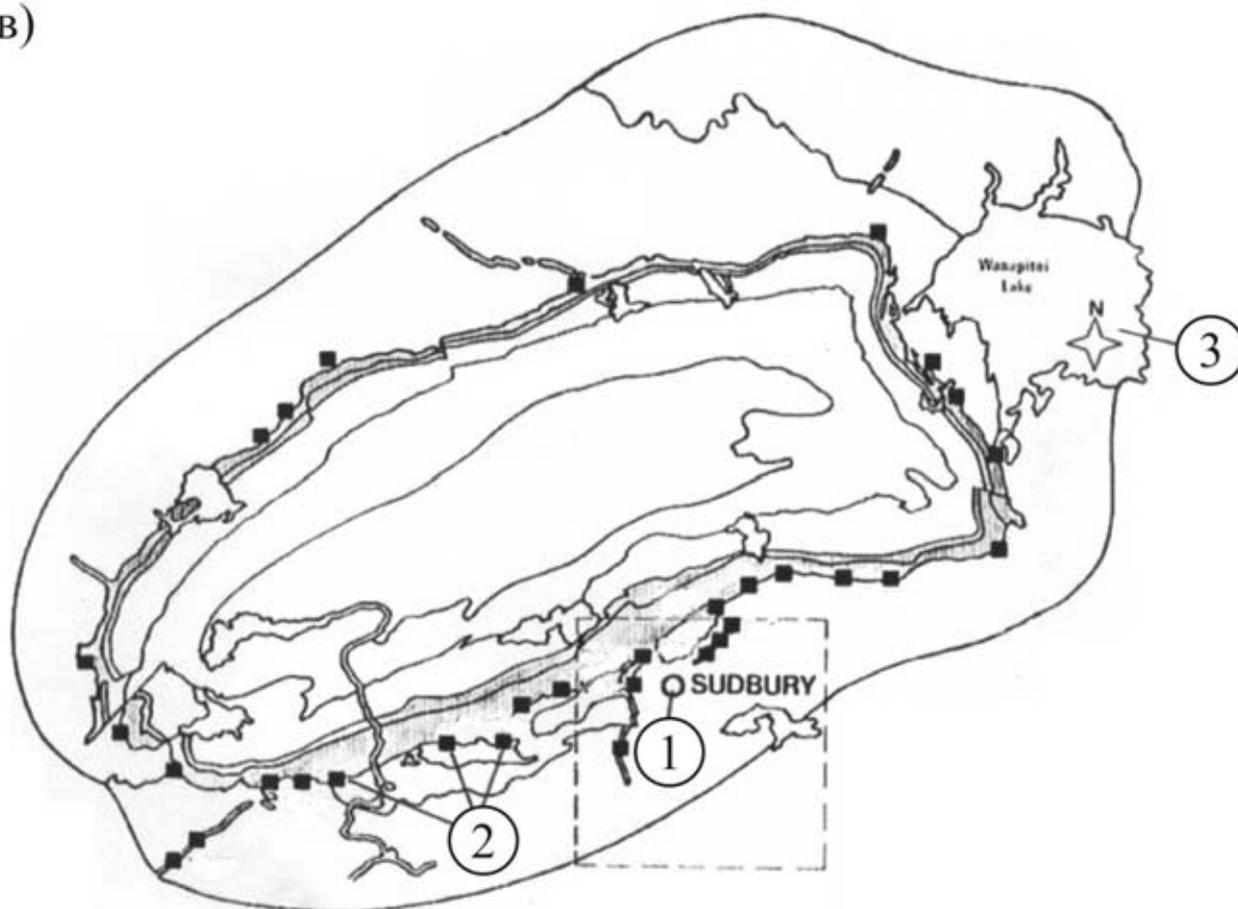


Рис. 4.68 (Окончание)

Нейтринная обсерватория Садбэри, расположенная на глубине 2039 м, связана с горными выработками шахты (рис. 4.69-4.72 цв. вкл.). В ней устанавливается детектор с тяжелой водой SNO, предназначенный для наблюдения нейтринных потоков от Солнца и других астрофизических источников. Детектор имеет диаметр 22 м и установлен в бочкообразной полости высотой 34 м (рис. 4.73 цв. вкл.).

Детектор состоит из прозрачной акриловой сферы диаметром 12 м, поддерживаемой со специальной платформы канатными подвесками. Сфера содержит 1000 т чистой тяжелой воды, окруженной, в свою очередь, сверхчистой обычной водой. Снаружи акрилового сосуда установлена шаровая структура, имеющая диаметр 17,8 м, изготовленная из стержней нержавеющей стали и служащая несущей конструкцией для 9456 фотоумножителей (рис. 4.74 цв. вкл.). Они фиксируют слабые вспышки света, возникающие при

попадании нейтрино в тяжелую воду.

В комплекс лаборатории входит электронное и компьютерное оборудование, контрольная комната, помещения очистки обычной и тяжелой воды. Вспомогательное оборудование размещается в отдельном туннеле. На рис. 4.75 (цв. вкл.) показан монтаж детектора.

Особым аспектом лабораторных исследований является обеспечение чистоты эксперимента и устранение любого вмешательства в измерения. Поэтому в состав комплекса входит мойка машин, материалов и оборудования. Персонал попадает в лабораторию через отдельный вход, где принимает душ и меняет одежду. В серии фильтров очищается воздух. Установки для очистки обычной и тяжелой воды располагаются в отдельном туннеле вблизи полости детектора. Системы электронных данных, мониторинга и безопасности располагаются в коротком туннеле, связывающем полость с остальной лабораторией.

Лабораторный комплекс использует существующую в шахте инфраструктуру вентиляции, водо-, пневмо-, электроснабжения, грузоподъемных и транспортных операций.

На серии рисунков (рис. 4.76 цв. вкл.) показан процесс строительства такого сложного подземного сооружения, как камера детектора. Вначале со стороны действующей шахты проходится подводная выработка, через которую формируется свод камеры и устанавливается мостовой кран для обслуживания дальнейших работ. Затем с выработки, подведенной к почве камеры детектора, снизу вверх проходится вертикальный спуск. На следующей стадии этот спуск расширяется сверху вниз до размеров камеры, причем по нему отбитая порода спускается вниз для дальнейшей транспортировки. После проходки камеры было смонтировано оборудование детектора, состоящее из поддерживающей сферы и собственно детектора – акрилового сосуда. Стадии монтажа показаны на рис. 4.77 (цв. вкл.).

Сооружение камеры детектора показано на рис. 4.78

(цв. вкл.).

На рис. 4.79 (цв. вкл.) показан один из вспомогательных туннелей, подводящих к полости детектора.

Национальная лаборатория Грэн Сэссо (Gran Sasso National Laboratory) института ядерных исследований Италии, строительство которой закончилось в 1987 г., расположена в 150 км восточнее Рима, примыкая к одному из двух параллельных автомобильных туннелей длиной 10,4 км, пересекающих горный массив Грэн Сэссо и связывающих города Лякуила (L'Aquila) и Терамо (Teramo) в центральной части Италии.

Лаборатория находится на высоте 963 м выше уровня моря. Высота гор над лабораторией составляет 1400 м, что защищает установленную аппаратуру от космических лучей, снижая их уровень в 1 млн. раз. Подземный комплекс лаборатории связан с автомобильным туннелем в трех точках (рис. 4.80 цв. вкл.) – въездом и выездом, расстояние между которыми равно примерно 600 м, а также промежуточным соединением, используемым, как пешеходный проход.

В состав лаборатории входят три больших зала, называемые А, В и С, а также служебные и аварийные туннели, связывающие эти залы. В зале А расположено оборудование по изучению происхождения и состава космических лучей, в зале В – по изучению магнитных монополей – гипотетических частиц, обладающих одним магнитным полюсом, в зале С – детектор обнаружения нейтрино Борексино (Borexino). На рис. 4.81 (цв. вкл.) схематически показана общая компоновка оборудования в залах лаборатории и в сечении зала.

Кроме работ, выполняемых собственными силами, лаборатория Грэн Сэссо принимает участие в совместном эксперименте с европейским ускорителем элементарных частиц CERN, расположенном на границе Франции и Швейцарии (рис. 4.82 цв. вкл.).

Интерьеры залов А, В и С показаны соответственно на

рис. 4.83 (цв. вкл.), 4.84 и рис. 4.85 (цв. вкл.). На рис. 4.86 (цв. вкл.) показан сферический детектор нейтрино Борексино, регистрирующий потоки частиц, поступающих от ускорителя CERN.

Каждый экспериментальный зал лаборатории имеет длину около 100 м, ширину и максимальную высоту 20 м в вершине с объемом около 25000 м³. Каждый зал имеет три аварийных выхода – два с северного и южного концов и один – посередине. Дополнительно к ним залы имеют проемы (один в зале С, по 2 в залах А, В) размерами 5х5 м для прохода оборудования больших габаритов.

Главные три зала соединены туннелем для доступа больших грузов (шириной до 8 м и высотой до 6 м), который соединяет вход и выход лаборатории, проходя через залы А и В. Один из вспомогательных туннелей используется как парковочная стоянка автомобилей. В северной части лаборатории располагается туннель интерферометра.

Вентиляция лаборатории осуществляется подачей воздуха с поверхности в количестве 40000 м³/час. Воздух подается через воздухопровод диаметром 1,5 м, который подвешен к вершине арки левого автомобильного туннеля, и затем поступает в южные части залов. Автоматическая система регулирует избыточное давление воздуха. Предусмотрены меры по аварийной вентиляции комплекса при пожаре.

Электроэнергия поступает от двух независимых источников питания, а также от третьего – дизельного генератора.

На рис. 4.87-4.89 (цв. вкл.) показано сооружение полосей залов лаборатории в период строительства.

В наибольшей в мире **Европейской лаборатории физики частиц CERN** (European Laboratory for Particle Physics) установлен ускоритель элементарных частиц со встречными пучками LEP/LHC, расположенный в туннеле длиной 27 км на границе между Францией и Швейцарией. Ускоритель служит для разгона электронов (материя) и позитронов (антиматерия) в противоположных направлениях до скорости

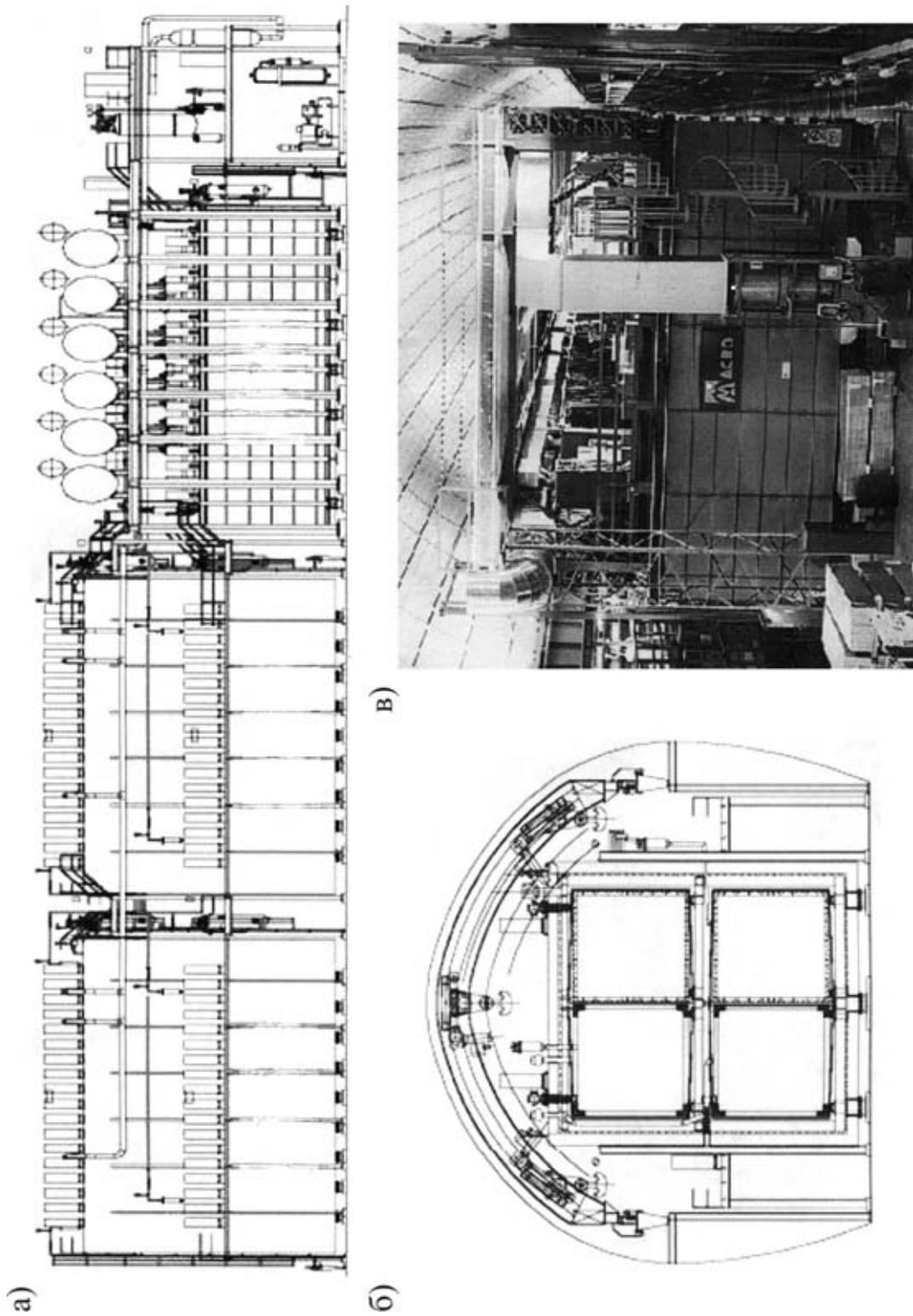


Рис. 4.84. Расположение оборудования и интерьер зала В
а – продольный разрез; б – поперечное сечение; в – интерьер зала В

близкой к скорости света и наблюдения за результатами их столкновений. Проводятся также эксперименты и с другими элементарными частицами. Вдоль туннеля диаметром 3,6 м установлены 5388 крупногабаритных электромагнитов, направляющих и фокусирующих пучки частиц (рис. 4.90 цв. вкл.).

Внутри кольца главного ускорителя LEP/LHC размещается малое кольцо синхротрона SPS, который служит для предварительного разгона элементарных частиц, придавая им необходимое количество энергии для инъекции в главный ускоритель (рис. 4.91 цв. вкл.).

Размеры ускорителей элементарных частиц определяются необходимостью поддерживать высокую скорость последних для получения нужного физического эффекта. Электроны и позитроны теряют энергию при движении по изогнутой траектории, поэтому для них требуются большие радиусы поворотов пути. Однако, поскольку от размеров ускорителей зависит их стоимость, отдельные университеты или даже отдельные страны не могли позволить себе только за счет собственных средств построить научный комплекс достаточно больших размеров. По этой причине в 1954 г. 12 европейских стран сформировали CERN – совместную организацию по строительству гигантского ускорителя с аббревиатурой LEP. С тех пор к ним присоединились еще 8 стран и проект был назван Европейской лабораторией физических частиц.

Первые экспериментальные результаты были получены в 1989 г.

Строительство туннеля под землей позволило обеспечить:

- стабильность и безопасность фундаментов, поддерживающих оборудование в рабочем состоянии с чрезвычайной точностью. Невозможно было найти на поверхности, особенно вблизи от Женевы, участок в диаметре более 8 км, достаточно плоский, чтобы обойтись без проходки

туннелей (рис. 4.92 цв. вкл.);

- полную изоляцию радиации, генерируемой ускоренными частицами и их столкновениями;
- получение разрешения властей на строительство в связи с невидимостью комплекса с поверхности земли.

Туннель ускорителя расположен в осадочных породах, имеющих общее название «молассы», состоящих из чередования горизонтально расположенных песчаников и песчаных мергелей. Слои молассы перекрыты отложениями гравия и песков, оставшимися от ледниковых периодов.

Построенный туннель почти, но не вполне циркульный, состоит из 8 прямых секций длиной примерно по 510 м, соединенных 8 арками длиной примерно 2750 м каждая. Большинство составных частей туннеля пробурено туннельными машинами по мягким осадочным породам. Они были спущены на уровень туннелей через 18 шахт глубиной примерно 5...150 м. Буровые машины управлялись лазерным лучом, что обеспечивало точность направления туннеля равную 1 см. Туннель крепился кольцами из предварительно напряженного железобетона. После завершения строительства туннель был оборудован трубой, по которой двигаются пучки элементарных частиц (рис. 4.93; 4.94). Поскольку последние при движении не должны сталкиваться с какой-либо другой материей, в трубе поддерживается полный вакуум. Во время обычных операций частицы циркулируют около 12 часов, за которые их пучок в вакуумной трубе пробегает расстояние 27 км около 500 миллионов миллионов раз.

Кроме синхротрона SPS, упомянутого ранее, в состав комплекса входят детекторы Алеф (Aleph), Дельфи (Delphi), L₃, Опал (Opal), имеющие разные назначения и конструкцию.

В последние годы ускоритель усовершенствуется и модернизируется с заменой существовавшего комплекса LEP и установкой более мощного нового оборудования LHC. Ре-

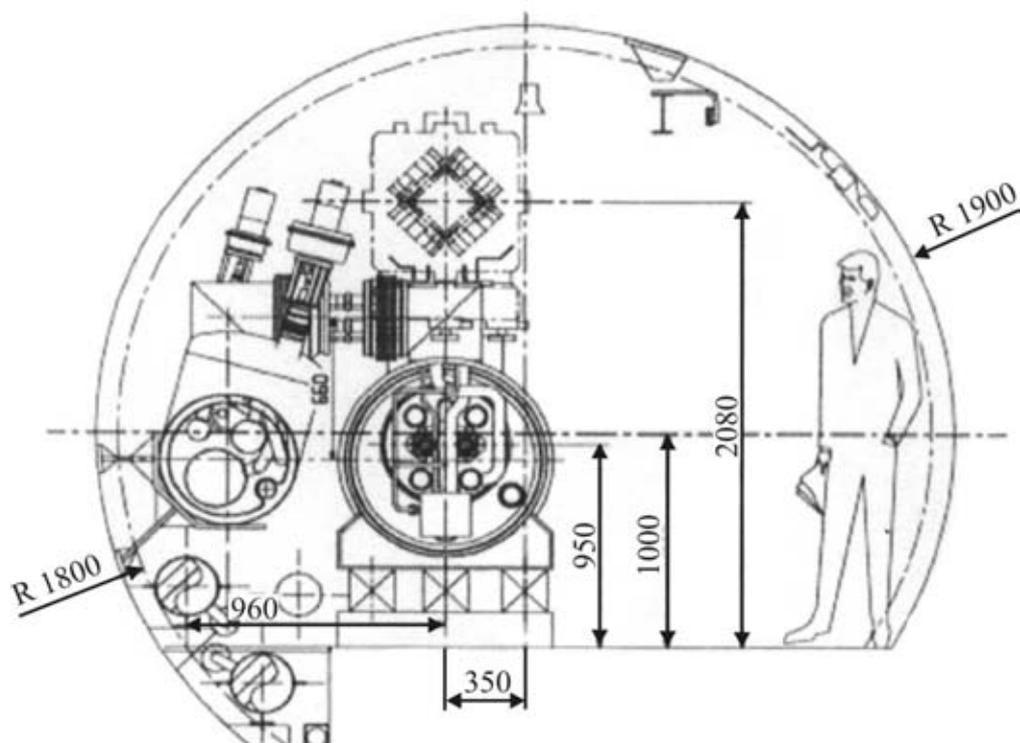


Рис. 4.93. Схема сечения туннеля ускорителя

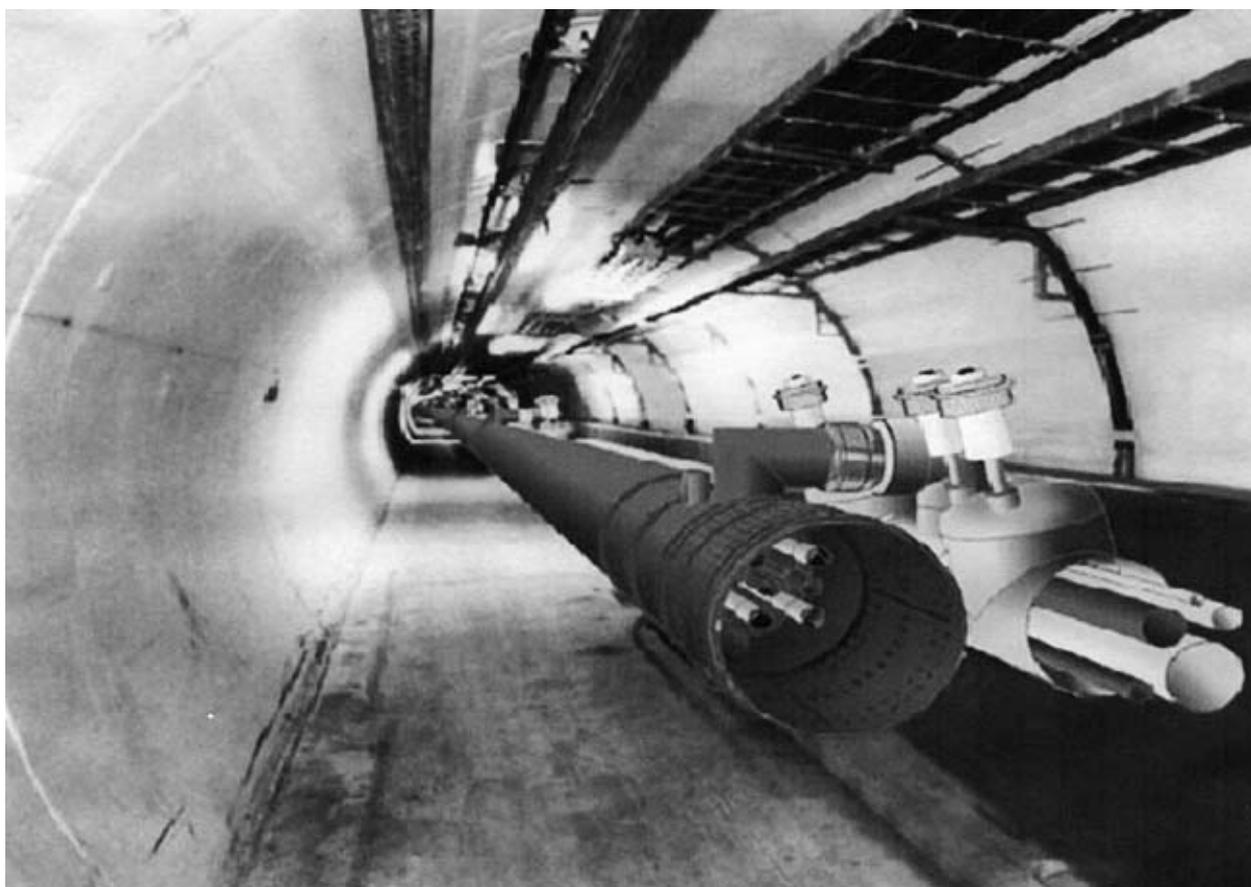


Рис. 4.94. Расположение оборудования в туннеле ускорителя

шение об этом было принято в 1994 г. Его ввод в эксплуатацию намечен на 2007 г. При сооружении комплекса ЛНС, кроме объединения новых подземных структур со старыми, требованием физиков было расположить новые полости каждого объекта как можно ближе друг к другу для уменьшения расстояния между собственно детекторами и компьютерами, собирающими и обрабатывающими полученные данные. Основными объектами реконструкции являются пункты 1 и 5 ускорителя (рис. 4.95, 4.96). Подземные работы пункта 1 состоят, в основном, из строительства дополнительных участков туннелей T12 и T18 между ускорителем и синхротроном, двух новых шахт PX14 и PX16, соответственно диаметрами 18 м и 12,6 м, обеспечивающих доступ к экспериментальной полости UX15 (рис. 4.97-4.103 цв. вкл.), а также собственно экспериментальной полости UX15, где

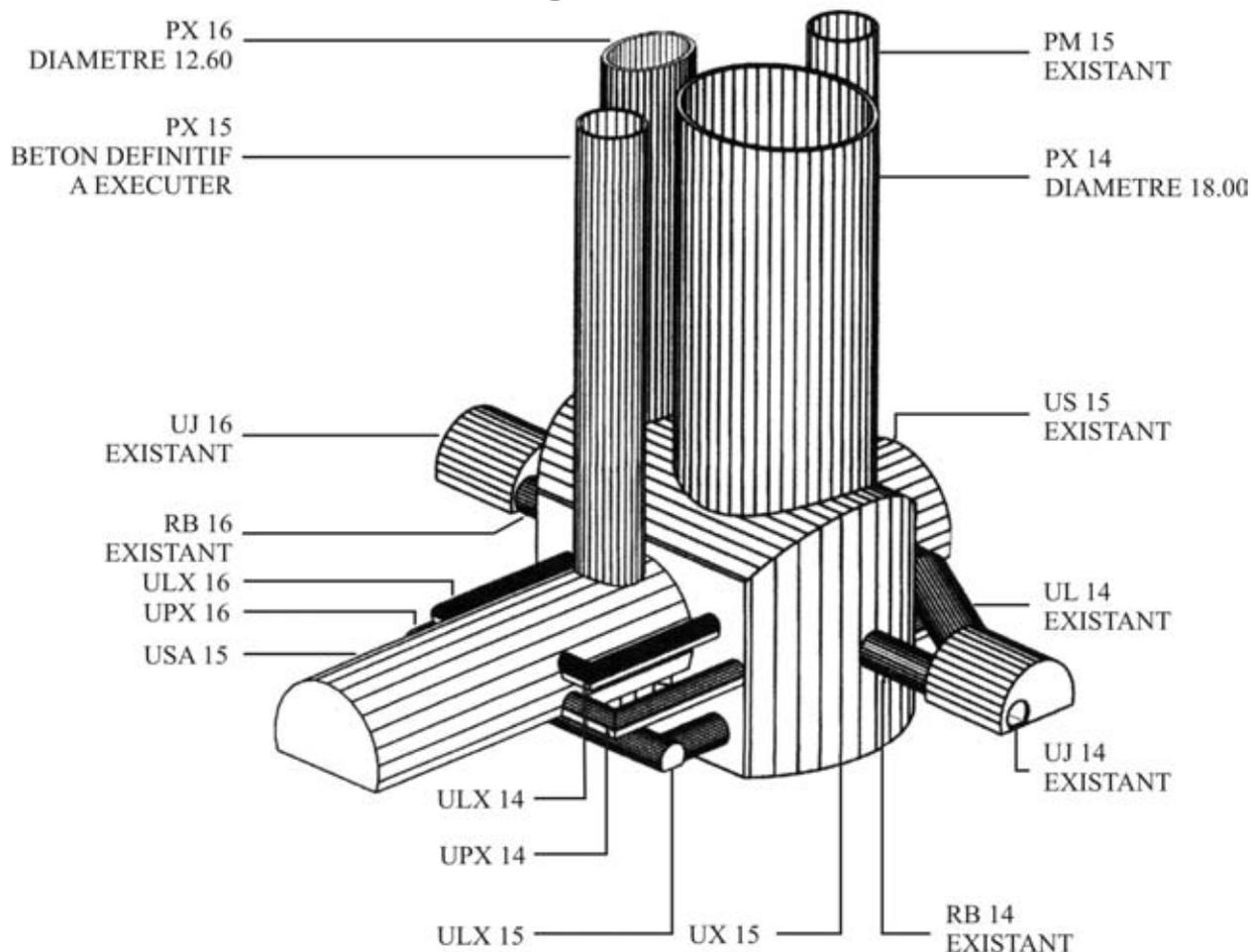


Рис. 4.95. Подземный комплекс ATLAS (пункт 1) реконструируемого ускорителя

будет устанавливаться детектор ATLAS (рис. 4.104-4.106 ЦВ. ВКЛ.).

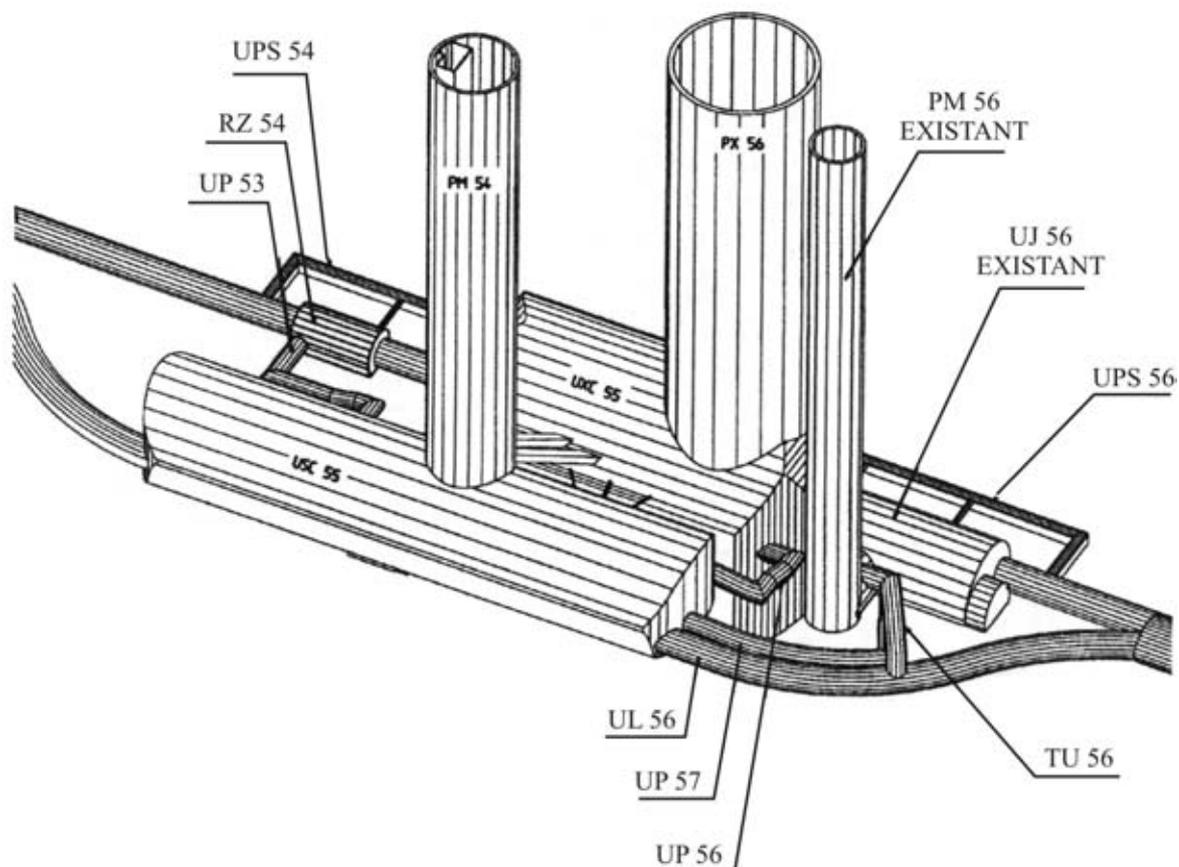


Рис. 4.96. Подземный комплекс CMS (пункт 5) реконструируемого ускорителя

Туннель T12 в пункте 1 общей длиной 2,6 км и диаметром в проходке 3,8 м проходилась проходческим комбайном с режущей головкой в противоположных направлениях от шахты доступа овальной формы.

В туннеле T18 использовалась буровая туннельная машина диаметром 3,6 м. Буровзрывные работы оказались ненужными из-за слабых пород, окружающих комплекс, что позволило предотвратить нарушения существующих структур. Две особые проблемы испытывали проходчики при проведении туннелей. Одна из них была связана с выпадением плохо связанных фрагментов пород из кровли. В туннелях сравнительно небольших диаметров такие падения не причиняли особого вреда, но усиливались с течением вре-

мени. Вторая проблема вызывалась вспучиванием почвы на высоту до 30 см при попадании воды на глинистые слои. Падения фрагментов пород предотвращались установкой дополнительной анкерной крепи и усилением набрызгбетона. Со вспучиванием почвы боролись ее дополнительной подрывкой проходческим комбайном.

Главная полость UX15 с внутренними размерами 30x35 м строится в осях параллельных туннелю LEP/ЛНС. Пол этой камеры будет расположен примерно на 92 м ниже уровня поверхности, оставляя таким образом более, чем 50 м пород над кровлей. Перпендикулярно к полости UX15 строится большая вспомогательная полость USA15. Эта полость диаметром 20 м и длиной 62 м связывается с существующей незакрепленной шахтой PX15, которая использовалась в период строительства LEP. Шахта PX15 усиливается, крепится и будет обеспечивать доступ персоналу к новым подземным структурам. Различные малые подводящие и вспомогательные туннели свяжут полости UX15 и USA15. Несколько камер увеличат существующий туннель ускорителя, чтобы обеспечить требуемое пространство для транспорта магнитов и размещения вспомогательных служб.

Мощная железобетонная стена отделяет компьютерный зал от детекторного, обеспечивая минимальное расстояние между ними и в то же время защищая физиков и персонал от радиоактивности, генерируемой экспериментом.

Новые подземные структуры в пункте 1 будут построены вокруг существующих объектов LEP, состоящих из шахты PM15, обеспечивающей доступ к полости US15 и двух галерей, связывающих US15 с двумя камерами туннеля LEP.

Поскольку проходческие работы проводятся в непосредственной близости от существующих шахт и полостей, требуются дополнительные бетонные работы по усилению последних. За бетонной крепью всех выработок и полостей устанавливаются водонепроницаемые мембраны. В некото-

рых местах зазор между постоянной бетонной крепью и окружающими породами заполняется сжимаемым слоем, включающим временную анкерную крепь, набрызгбетон, усиленный стальным волокном, и листы материала, подобного полистиролу толщиной 100 мм. Этот слой обеспечит податливость крепи при сдвигении окружающих пород, что особенно важно при стадийной проходке полостей.

Существует только несколько полостей в мире с пролетами большими чем детекторный зал в ATLAS. Один из них – 60-метровый пролет в гранитной скале для хоккейного олимпийского стадиона в Норвегии. Другая полость впечатляющих размеров в осадочных породах такой же крепости, как в CERN – одна из камер Евротуннеля, построенного под Английским каналом. Но ее пролет равный 22 м значительно меньше, чем описываемого детекторного зала ATLAS.

Особенностью сооружения полости этого детектора являлось применение канатной подвески ее бетонного свода (рис. 4.107 цв. вкл.). Такая подвеска потребовалась по двум причинам:

- она позволила вначале соорудить свод полости детектора ATLAS, а затем под его защитой сверху вниз проходить отдельными заходками остальную часть полости;

- моделирование взаимного влияния сооружаемых объектов показало, что даже при самой густой установке крепежных анкерных болтов и толстых слоях набрызгбетона, усиленного металлической сеткой, стабильность свода шириной 35 м остается ненадежной.

Было решено подвесить свод на системе канатов, установленных из галерей, пройденных вбок от двух вертикальных шахт доступа на 15 м выше кровли полости. Из этих коротких тупиковых туннелей были пробурены скважины, сквозь которые протягивались анкерно-закрепленные натянутые стальные канаты. 38 таких канатов установлены в регулярном порядке на своде длиной 56 м. Для контроля ра-

боты канатов в ходе строительства установлены специальные геотехнические инструменты. Напряжение канатов будет снято только после полного завершения проходки и крепления полости, включая монтаж подкрановых консольных путей, т.е. когда свод полости будет опираться на стены.

Подземные работы в пункте 5 состоят из двух новых полостей, двух новых шахт с внутренними диаметрами 20 м и 12 м, ряда меньших соединений и подсобных туннелей, а также расширения основного туннеля LEP. Новая экспериментальная полость UX55 шириной 26,5 м и высотой 24 м, обслуживающая полость US55 шириной 18 м и высотой 11,5 м параллельны друг другу и расположены рядом (рис. 4.108 цв. вкл.). Мощность слоя крепких пород над главной полостью равна всего 20 м с перекрывающей толщей слабых пород над ней 50 м.

Проходка полостей и шахт для детектора CMS в пункте 5 усложнялась большим вертикальным размером полостей, их очень близким совместным расположением и плохими геологическими условиями. В этом месте верхние водонасыщенные ледниковые отложения гравия и песка распространяются до глубины 55 м и уменьшают покрытие полости слоем более устойчивой массы до 20 м.

Компьютерное моделирование (рис. 4.108 цв. вкл.) показало, что столь близкое расположение двух полостей друг от друга требует замены породного целика между ними на бетонную перемышку. Такая перемышка толщиной 7 м, высотой 30 м, длиной 50 м была возведена из монолитного железобетона со стекловолоконистой и стальной арматурой. Была также применена водонепроницаемая мембранная система, установленная перед заливкой бетона. Крепежные системы обеих полостей связаны анкерными болтами и бетоном.

Шахты в пункте 5 должны были проходить через водонасыщенные породы мощностью 50 м, поэтому применя-

лось их замораживание жидким азотом и последующая цементация, чтобы предотвратить приток воды.

При сооружении полостей учитывалось влияние проходческих работ на состояние существующих комплексов, где оборудование должно было функционировать в нормальном рабочем режиме.

В подземных полостях устанавливается большое количество оборудования, в том числе весьма крупногабаритного (рис. 4.109 цв. вкл.). Его обслуживание осуществляется со специально предусмотренных балконов, лестниц, лифтовых устройств.

Сложность строительства для обоих детекторов, кроме чрезвычайно больших размеров полостей, усугублялась жесткими условиями физиков по их расположению. Если бы полость можно было сдвинуть, для них бы нашлись более подходящие геологические условия, а расстояния между строящимися объектами увеличены для обеспечения устойчивости и уменьшения влияния одних проходческих работ на другие.

Существующие подземные структуры ускорителя расположены в песчаниках и мергелях, которые скорее случайным, чем преднамеренным выбором стали условиями для строительства туннелей и малых полостей ускорителя LEP. Когда в 1950-х гг. было принято решение о строительстве CERN, геологические условия и возможность ведения в них больших подземных работ не были первоочередными проблемами. Для ранних экспериментов в мелких сооружениях земляные работы проводились открытым способом. Тогда трудно было представить, какие объемы подземных работ станут необходимы для дальнейших опытов.

Кроме усовершенствования и модернизации собственно ускорителя, в последние годы в комплексе CERN ведется подготовка к исследованиям, совместным с лабораторией Грэн Сэссо (см. ранее): осуществляется проект CNGS по генерации интенсивного пучка нейтрино в направлении этой

лаборатории (рис. 4.110 цв. вкл.). Эта цель достигается:

- производством порций протонов высокой энергии;
- направлением этого пучка к гранитной мишени, установленной в камере длиной 150 м и диаметром 6,5 м;
- производством вторичного пучка пионов и каонов столкновением пучка протонов с ядрами мишени;
- направлением пионов и каонов в сторону Грэн Сэссо;
- распадом пионов и каонов при полете на мюоны и нейтрино;
- поглощением мюонов земной корой и продолжением движения нейтрино к Грэн Сэссо. Продолжительность движения пучка нейтрино – 2,5 миллисекунды.

Комплекс, производящий нейтрино, располагается в подземных туннелях и других сооружениях (рис. 4.111 цв. вкл.). Общая длина туннелей составляет 2,7 км, их диаметр находится в пределах 3,1...6,5 м. Туннели и полости расположены на глубинах 55...122 м. Для полной изоляции строительства от действующего ускорителя проходится специальная шахта диаметром 8 м и глубиной 57 м, используемая только на период строительства. Шахта крепится бетоном и после окончания строительства будет накрыта бетонной плитой, засыпанной землей, с тем, чтобы вернуть ландшафт к его первоначальному состоянию.

БИБЛИОГРАФИЯ

ГЛАВА 1

- J.Carmody. Underground Building Design: Commercial and Institutional Structures. New York, Van Nostrand Reinhold Co, 1983.
- H.Granick. Underneath New York, Fordham University Press, 1991.
- L.Hall. Underground Buildings: more than meets the eye. Sander, CA, Quill Driver Books, 2004.
- R.S.Sinha. Underground Structures: Design and Construction. New York, Elsevier Science Pub. 1991
- R. Sterling. Underground Space Design. New York, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- Building a Virtual Time Machine, <http://www.llnl.gov/str/pdf>.
- Caverns... <http://www.elgas.com.au/corp/cavern.htm>.
- Creative Use of the Underground in Oslo, the Capital City of Norway.
- Design of Large Underground Caverns-a Case History Based on the Mingtan Pumped Storage Project in Taiwan. www.rocscience.com/hoek/pdf.
- Energy Storage and Renewables. www.ee.gub.ac.uk/blowing/activity.
- Experiences from Planning and Building of Large Storage Facilities in Rock. www.tunnel.no.
- Focus on Rock Excavation Technology, www.construction.no.
- General Design Procedure for Underground Openings in Norway. www.construction.no.
- Geoenvironmental Considerations in the Optimum Use of Underground Space by R. Sterling, J.Godard. www.ita-aite.org/cms/filemounts/general/pdf.
- Large Powerhouse Caverns in Weak Rock. [www.liv.ac.uk\(Geophysics/chapter 13.pdf\)](http://www.liv.ac.uk(Geophysics/chapter%2013.pdf))
- Norwegian Rock Technology, www.tunnel.no

Norwegian Tunnel Technology-The Wonder under Sea.

<http://www.construction.no>

Other Underground Laboratories.

http://hepwww.rl.ac.uk/ukdmc/others/ug_labs.html.

Rockbolts and Cables, www.rocsciens.com/hoek/pdf.

Science in the Future: Vision for 10 years ahead by G Radda.

<http://www.vr.se/filserver/index.asp?file=138NTMRAEZQ4>.

The Website for Mining Technology, <http://www.mining-technology.com>

ГЛИАВА 2

A Different Approach to Shallow Geothermal Energy-
Underground Thermal Energy Storage (UTES).

www.geotermie.de.

A Guide to the Range and Suitability of Electrical Energy
Storage Systems for Various Applications, an
Assessment of Possible Policy Effects by S.Gandy.

www.iccept.ic.ac.uk/as-1.html.

Air Cushion Surge Chamber in Kvilldal Power Plant the Ulla-
Forre Development. www.tunnel.no.

Airy Solution.

http://www.popularmechanics.com/science/research2001/4/Airy_solution/print.phtml.

Anchored Crane Beams in Hydroelectric Caverns,

www.pocsience.com/hoek/pdf

Australia's First "Natural" LPG Storage Cavern.

<http://www.emit.csiro.au/irmovation/1999-06/pdf>.

CAES: Underground Storage.

<file://A:\CAES%20underground%20storagehtm>.

Compact Design of Caverns for Hydropower Stations in
Norway, www.tunnel.no.

Compressed Air.

http://www.uaf.edu/energyin/webpage/pages/energy_stora

[ge/compressedair.htm](#).

Compressed Air Energy Storage,

http://energy.gld.gov.au/electricity/information_sheets/energy_storage/info_sheet/ener.

Compressed Air Energy Storage(CABS).

[http://www.easells.net\(CAES\).html](http://www.easells.net(CAES).html).

Gas Storage at the Abandoned Lyaen Coal Mine near Denver, Colorado. <http://www.epa.gov/cmop/pdf/stu001.pdf>.

Gas Turbine Electric Generation Using Stored Compressor Air.

<http://criepi.denken.or.jp/en.pdf>

Coal Mine Methane Storage in Abandoned Mines.

<http://www.epa.gov/outreach/cmop/pdf>.

Crude Oil Caverns at Mongstad, Norway, www.construction.no.

Deep-Well Storage in Salt Caverns, <http://lissarnia.coin/pdf>.

Energy Mine. <http://pe.archives>.

printthis.clickability.com/pt/cpt?action=cptandtitle=compressed+air+energy+storage.

Energy Performance of Borehole Thermal Energy Storage System.

www.ibpsa.org/proceedmgs/bs01/bs01_1009_1016.pdf.

Energy Storage:Enabling a Future for Renewables?

[File:///A:\Energy20Storage%20-%20Enabling%20a%20Future%20for%20Renewables%200-%20Full%...](file:///A:\Energy20Storage%20-%20Enabling%20a%20Future%20for%20Renewables%200-%20Full%...)

Energy Storage Engineering Development Center,

http://www.nef.or.jp/english/info/pdf/air_19.pdf.

ESI Eurosilo BV. <http://www.power-technology.com>.

International Water Power and Dam Construction.<http://www.waterpo.wermagazine.com>.

Huntorf CAES.More than 20 years of Successful Operation by

F.Crotogino,K.Mohmeyer,R.Scnarf. http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_archive/AKE2003H

vortrag/AKE/2003H.

Large Scale Energy Storage Systems, www.doc.ic.uk/~mpjO1

[/ise2grp/energystorage report/storage.html](#).

Methane from Abandoned Coal Mines in the UK.

[www.dti.gov.uk/energy/coal/cfft/dtireportcrnm.pdf](#)

Moving Coal Stocks Underground in Helsinki,

[www.yit.fi/attachment.asp?path](#)

NaturalGas.org.

[http://www.naturalgas.org/naturalgas/storage.asp](#)

PB Energy Storage Services, Inc.

[http://www.pbenergy.com/rnined_cavs.htm](#)

Profile of the Strategic Petroleum Reserve.

[http://www.gsu.edu/~geohab/pages/geol2001/energy/strategic_petroleum_reserve.htm](#).

Pumped Hydroelectric Energy Storage,

[http://www.doc.ic.uk/~mpj01/use2jrp/energystorage_report/node6.html](#).

Queensland Treasury-Office of Energy,

[http://www.energy.gld.gov.au/electricity/storage/info_sheet/ener...](#)

Reservoir Gas Storage Facilities and salt Cavern Gas Storage.

[http://www.falcongass-storage.com/pdf/article.singlepointfailure.pdf](#).

Ridge Energy Storage, [http://www.ridgeenergystorage.com](#).

Schlumberger Oilfield Services. [http://www.oilfield.sib.com](#)

Sealing of Water Pressure Closure at the Underground Storage of Natural Gas Haje. [http://www.ita-aites.cz/uk/tunnel_12_99/4.html](#).

[http://www.ita-aites.cz/uk/tunnel_12_99/4.html](#).

Siah Bishe Pumped Storage Project-Iran.

[www.multzenberg.ch/iran/siah_Bishe.pdf](#).

Snow and Ice Storage for Cooling Applications,

[www.sb.luth.se/~bon/wl20Q2.pdf](#).

Storage Technology. [http://www.rwedge/en_192.htm](#).

Strategic Petroleum Reserve Storage Sites.

[File://A:\DOE%20-%20Fossil%20Energy%20-%20Strategic%20Petroleum%20Reserve%20Sites.htm](#).

Storing Petroleum Products in Underground Rock Caverns,
<http://www.eptc.com/sq/journals/issue4/StoringPetroleum.pdf>.

Technical and Economic Assessment of Coalbed Methane Storage in Abandoned mine Workings,
www.epa.gov/coalbed/resources/extra/5-98.pdf.

Testimony before the Kansas Senate Utilities Committee, Topeka, Kansas. By J.Ratigan. www.kgs.ukans.edu/Hydro/Hutch/GasStorage/ratigan/pdf.

The Basics of Underground Natural Gas Storage, www.eia.doe.gov/pub/oi/1_gas/natural_gas/analysis_publications/storagebasics/storagebasics.html.

The Rafnes Propane Storage Cavern-12 Years of Successful Operation, www.tunnel.no.

The Strategic Petroleum Reserve, www.spr.doe.gov.

The Water Curtain-a Successful Means of Preventing Gas Leakage from High-Pressure Unlined Rock Caverns by H.Kjrholf,E.Broch. www.cpnstruction.no.

Underground Gas Storage:Technological Innovations for Increased... http://www.world-energy.org/wec-geis/publications/default/tech_papers/17th_congress/2_2_09.asp.

Underground Storage-Centerpoint Energy Pipeline Services. www.centerpointenergy.com/6-4_underground.html.

Underground Thermal Energy Storage, <http://www.iea-eces.org/techniques/under-ground.html>.

Underground Thermal Energy Storage, A Choice for Sustainable Future.

[File:///A:/underground%20thermal%20energy%20storage%20A%20choice](file:///A:/underground%20thermal%20energy%20storage%20A%20choice).

Underground Storage of Petroleum and Natural Gases, <http://www.world-petroleum.org/isc2004/file%2020/128-129.pdf>.

What is the Strategic Petroleum Reserve.

<http://www.howstuffworks.com>.

ГЛІБА 3

A Unique Tunnel in Yucca Mountain.

www-old.miningandconstruction.com.

Collaboration of European Low-level Underground Laboratories

Cellar. [File:///A:/physi-kalish
techmsche%20Bundesanstalt%2\(XPTB\).htm](file:///A:/physi-kalish%20techmsche%20Bundesanstalt%2(XPTB).htm).

Current Locations of Spent Nuclear Fuel.

[File:///A:/current%20locations%20of%20
spent%20nuclear%20fuel/htm](file:///A:/current%20locations%20of%20spent%20nuclear%20fuel/htm).

Fact Sheets. [http://www.ocrwm.doe.](http://www.ocrwm.doe.gov/factsheets/doeympOO1Tprint.shtm)

[gov/factsheets/doeympOO1Tprint.shtm](http://www.ocrwm.doe.gov/factsheets/doeympOO1Tprint.shtm)

EBS Architecture for Disposal of CAT. B and C Waste in Boom

Clay. [www.euridice.be/downloads/GTA_NIKOD_2003
Oil.pdf](http://www.euridice.be/downloads/GTA_NIKOD_2003_Oil.pdf).

Final Environmental Assessment for Conducting Astrophysics and
Other Basic Science Experiments at the WIPP site.

www.ws/library/ea/toc.pdf.

High-Level Radioactive Waste.

[File:///A:/high-level%20radioactive%20waste%20
\(nuclear%20waste%20explained\).htm](file:///A:/high-level%20radioactive%20waste%20(nuclear%20waste%20explained).htm).

Home Page Oversight of Yucca. [http://www.yuccamountain.](http://www.yuccamountain.org)
org.

Ice Sheet Disposal.

[File:///A:/ice%20sheet%20disposal%20\(disposal%20optio
ns%20-%20nuclear%20waste%20expla...](file:///A:/ice%20sheet%20disposal%20(disposal%20options%20-%20nuclear%20waste%20expla...)

Japan's Nuclear Power Program.

<http://www.japannuclear.com/nuclearpower>.

Long Blast Round Technology at the Underground Research
Laboratory, [www.mjconstruct.](http://www.mjconstruct.com/tunnel/archive/20Q2/november/long%20blast%20round%20tech.pdf)

[com/tunnel/archive/20Q2/november/long%20blast%20rou
nd%20tech.pdf](http://www.mjconstruct.com/tunnel/archive/20Q2/november/long%20blast%20round%20tech.pdf).

Monitoring during the Stepwise Implementation of the Swedish

Deep Repository for Spent Fuel.

<http://www.skb.se/upload/publication/pdf/R-04-13webb.pdf>.

Monkton Farleigh-Nuclear Waste Dump.

<File://A:\monkton%20farleigh%20-%20nuclear%20waste%20waste%20dump.htm>.

National Safety Council. <http://www.nsc.org>.

Nuclear Waste Management Strategies by G.Cerfice.

<http://library.nevada.edu/yucca/wmstrategies.pdf>.

Nuclear Waste Storage.

<File://A:\the%20bane%20of%20nuclear%20energy%20nucle-ai%20waste%20-%20storage.htm>.

Nuclear Waste. http://www.policvalmanac.org/environment/archive/nuclear_waste.htm

http://www.policvalmanac.org/environment/archive/nuclear_waste.htm

Nuclear Watch. <http://www.nukewatch.org/wipp.pdf>.

Office of Civilian Radioactive Waste Management.

<http://www.ocrwm.doe.gov>.

Opalinus Clay Project.

www.nagra.ch/english/aktueH/presse/ProjectOpa.pdf.

Prototype Repository in Swedish Bedrock,

[www.vaisala.com\(DynaGen_Attachment\)_art_5040/5045.pdf](http://www.vaisala.com(DynaGen_Attachment)_art_5040/5045.pdf).

Radioactive Waste.

http://en.wikipedia.org/wiki/radioactive_waste.

Radioactive Waste Management in Sweden Experiences and

Plans, www.skb.se/upload/publications/pdf/wikstrom-cambrige-98.pdf.

Radwaste Volume Reduction.

<http://www.radwaste.org/disposal.htm>

Retrievable Disposal of Radioactive Waste in the Netherlands.

<http://www.rhkhu/>

Pock Mechanics Considerations in the Siting of Sweden's

Nuclear Waste Repository.

www.skb.se/upload/publications/pdf/rock_mechanics_considerations.pdf.

Storage and/or Disposal.

http://cea.fr/gb/publications/clefs46/pageag/clfs46_61.html.

Storing Nuclear Waste.

<file:///A:/MIE%20online%201esson%20-%20storing%20nuclear%20waste.htm>.

Structurae. <http://www.structurae.de>.

The Bane of Nuclear Energy: Nuclear Waste-Storage.

<File:///A:/the%20bane%20of%20nuclear%20waste%20-%20storage.htm>.

The Research Division at Virginia Tech-Research Magazine,

<http://www.research.vt.edu/resmag/2002summer/careerwirmers.html>.

The WIPP Facility. http://cardmn.org/repository_a.html.

Underground Operations at the Waste Isolation Pilot Plant,

<http://books.nap.edu/books/0309S2432.html>.

Underground Research Laboratory(URL) Program in Japan,

<www.utnl.jp/~rohonobu/PBNC73-3.pdf>.

Waste Treatment. <http://web.em.doe.gov/em30/004.gif>.

What are the Advantages of Underground Repositories?

<File:///A:/english%20pages.htm>

Why Yucca Mountain?

<http://www.ocrwm.doe.gov/ymp/about/why.shtml>.

WIPP Background. http://cardnm.org/backfrm_a.html.

WIPP Facility, <http://www.nsc.org/ehc/wipp/facil.htm>.

WIPP Locator Map. <file:///A:/WIPP%20locator%20map.htm>.

Yucca Mountain-A Potential Geologic Repository.

<www.nsc.org/public/ehc/vucca.pdf>.

Yucca Mountain Project.

<File:///A:/quick%20fact%20about%20vucca%20mountain.htm>

15A/538DTR. Draft Technical Report, <www.fatburen.org/friges.reisch/wastemanagement20041EC.pdf>.

50 years of Science in the National Interest LLNL.

<http://www.llnl.gov/50science.jpg>.

ГЛАВА 4

- Boulby Mine Shaft Lining Design-Second Restoration.
<http://docserver.ingentaselect.conVdeliver/cw/manev/03717844/Vinnl/52/pl3.pdf>.
- Boulby Potash Mine, United Kingdom, <http://www.mining-technology.com/proiectprintable.asp?projectD-1201>.
- Carlsbad Underground-Lab, <http://mocha.phys.washington.edu-infjalk/workshops/neutrino02/plenary/people>.
- Centre for Underground Physics in Pyhasalmi Mine,
<http://cupp oulu.fi/>
- CERN Bulletin 11/2000.
<http://bullarchive.web.cern.ch/bullarchive/0011/art/textE.html>.
- CERN Caverns. <http://members.chello.at/sylvia.beer/cernframe.htm>.
- CERN Environment Policy.
<http://cernenviro.web.cern.ch/CERNenviro/>
- CNGS: Opening the Way to Gran Sasso.
<http://bulletin.cern.ch/eng/articles.php?bullno=29/2003andbase=artandartno=2003-082>.
- Cleveland Potash Mining,
<http://www.clevelandpotash.ltd.uk/mining.htm>.
- Deep Sphere: The Unique Structural Design of the Sudbury Neutrinos Observatory Buried within the Earth.
http://www.ewh.ilee.org/reg/7/millennium/neutrino/sno_deep.htm
- Deep Underground Science and Engineering Laboratory.
<http://www.int.washington.edu/DUSEL/>.
- Fermilab's Future.
www.doserver.fnal.gov/projects/doingpictures/presentation/womer-sley/community/panel.pdf.
- General Description of the CERN Project for a Neutrino Beam to Gran Sasso. <http://proi-cngs.web.cern.ch/proi-cngs/download/CNGSDGVE/cngsdgve.pdf>.

Great Excavations by S.Wallis.

<http://www.pubs.asce.org/ceonline/01/0108feat.html>.

International Facility for Low Background Particle Astrophysics Experiments. wmv.physics.ucla.edu/hep/dmou/talks.noble.pdf.

Kamiokande. <File://A:\kamiokande.htm>.

Lab Design and Infrastructure.

http://www.snolab.ca/files/workshops/workshop_eduncan.pdf.

Laboratory Nazionali del Gran Sasso-INEN.

<http://www.interactions.org/cms7pid>

Large Underground Space for Neutrino Detectors. www.hep.princeton.edu/~mcdonald/nufact/neutrmotrans7.pdf.

LEP.

<http://outreach.web.cern.ch/outreach/public/cern/picturepacks/LEP/captions.html>.

Location of DELPHI.

<http://building.web.cern.ch/map/coordinate/DELPffl/lep8-delphi/329.0000/557.0000/522/350/400??...>

Max-Planck-Institut für Kernphysik.

http://www.mpi-hd.mpg.de/non_acc/images/genius/

MINOS Far Detector Laboratory,

<http://www-numi.fnal.gov/minwork/fardet/farhome.html>.

National Underground Science Laboratory.

<http://www.sdsrnt/edu/es/mining/nusl/hmstk/mhist/562x410.ipg>.

National Underground Scientific and Engineering Laboratory at Homestake. <http://ktlesko.lbl.gov/nusel>.

Neutrino Physics at Gran Sasso National Laboratory.

<http://www.lp01.mfn.it/poster/lags/bettini.pdf>.

NSF Site Panel Report Concerning a Deep Underground Science and Engineering Laboratory.

<http://www.nsf.gov/od/lpa/news/03/duselsitpanel.htm>.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.

http://www.hep.upenn.edu/SNO/papers/sno_nim.pdf.

Physical Aspects.

<http://tools.search.yahoo.com/language/translationpage.php?tt=urlandtext=;http%3a//www.1...>

Physics at Gran Sasso National Laboratory.

http://www.lngs_infn/contents/docs/pdf.

Proposal for a National Underground Science Laboratory at Mt.San-Jacinto.

<http://www.sns.ias.edu/~inb/laboratory/saniacinto.pdf>.

Prospects for an Underground Laboratory in Carlsbad, NM.

www.WIPP.carlsbad.nm.us/science.

Prospects for an Underground Laboratory in Carlsbad,

<http://www.sns.ias.edu/~jnb/lab-oratory/carlsbadprop.pdf>.

Report on the Technical Evaluation of Underground Laboratory

Sites. <http://www.sns.ias.edu/laboratory/evaluationJon.html>.

San Jacinto: A Proposed Deep Lab with Horizontal Access,

<http://www.ps.uci.edu/~kropp/public/sanjacinto/sanjacinto.pdf>.

San Jacinto National Underground Science Laboratory.

<http://www.ps.usi.edu/~kropp/public/sanjacinto/overview3401.pdf>.

School of Natural Sciences, <http://www.sns.jas.edu.html>.

Soudan Underground Laboratory,

<http://www.lngs.infn.it/site/exppro/panagic/sections/particle/experiments/soudan.html>.

Soudan Underground Laboratory.

<http://www.sudan.umn.edu/albums/MINOS>.

Snolab. <http://www.snolab.ca>.

SNO-LAB Project. <http://www.unine.ch/phys/TPC/sinclair.pdf>.

Spectacular Excavations for Physics Research,

<http://www.mjconstruct.com/tunnel/archive/2001/november/spectacular%20excavations.pdf>.

Sudbury Neutrino Observatory,

<http://www.lngs.infn.it/site/exppro/panagic/sections/particle/experiments/sno.html>.

Sudbury Neutrino Observatory(SNO).

<http://laurentian.ca/physics/SNO/CHOCE.html>.

The Infrastructure of the Centre for Underground Physics in Pyhasalmi mme. http://cupp.oulu.fi/pdf/cupp_infra.

The Italian Gran Sasso National Laboratory,
www.aidic.it/italian/congressi.

The National Underground Science and Engineering Laboratory at Homestake.

http://ktlesko.lbe.gov/nusel/reference_design_6j30.pdf.

The New Caverns for LHC experiments:ATLAS and CMS.

<http://st-diy.web.cern.ch/st-div/workshop>.

The New Deep Ore at Pyhasalmi.

http://www.gsf.fi/explor/zinc/figures/pyhasalmj/pi-hasalmi_deep_ore_1.jpg.

The Soudan Underground Laboratory, <http://131.212.67.203/>

The Soudan Underground Laboratory,

<http://www.hep.umn.edu/soudan/brochure.html>.

The Sudbury Neutrino Observatory,

<http://www.sno.phy.queesu.ca>.

Tunnel Surveys for New CERN Particle Accelerators by R.Glaus,U.Ingensand.

http://www.geomem.lthz.ch/downloads/FIG_2002_CERN_Glaus.pdf.

Two New Caverns for LHC Experiments:ATLAS and CMS.

<http://st-div.web.cern.ch/st-div/workshop/ST98WS/technology/hammer.pdf>.

UK Dark Matter Collaboration,

<http://hepwww.rl.ac.ukdmc/project/ZEPLIN>.

Underground Science: The US Effort to Create a Deep Underground Laboratory.

<http://www.aps.org/apsnews/0803/080312.cfm>.

Underground Structures at Point 2.

<http://cernenviro.web.cern.ch/CERNenviro/media/sitepics/big/p2/p2-sout.gif>.

Welcome to the Soudan Underground Laboratory,
<http://www.physics.umn.edu>.

Перечень цветных рисунков

ГЛАВА 1

- Рис. 1.6.** Изометрическая модель расположения подземного комплекса Мингтан и нарушенных зон
- Рис. 1.7.** Варианты формы сечений машинных залов гидростанции Мингтан
- а) грибообразная форма с арочной кровлей;
 - б) подковообразная кровля с вертикальными стенами;
 - в) эллиптическая форма.
- Рис. 1.8.** Цифровая модель, показывающая схему необходимого усиления анкерной крепью пород, окружающих полости
- 1 – канатные анкера;
 - 2 – нарушенная зона;
 - 3 – песчаник;
 - 4 – дренажная галерея.
- Рис. 1.9.** Цифровая модель, показывающая потерю несущей способности породного массива и деформацию контуров полости
- 1 – предварительно усиленная зона;
 - 2 – конвергенция стен полости;
 - 3 – деформированный профиль стен выработки.
- Рис. 1.13.** Последовательность операций при проходке подземной полости буровзрывным способом
- а) бурение скважин для производства взрывных работ и установки анкерных болтов;
 - б) погрузка породы, отбитой при взрыве;
 - в) покрытие кровли и стен полости слоем набрызгбетона.
- Рис. 1.14.** Расположение оборудования при бурении скважин
- Рис. 1.15.** Скважины в забое полости, подготовленные для последующего заряжания взрывным веществом
- Рис. 1.17.** Подземная полость большого сечения
- Рис. 1.18.** Окончание формирования арочной кровли подземной выработки
- Рис. 1.23.** Работы по нанесению набрызгбетона
- Рис. 1.24.** Схема работы проходческого комбайна

Рис. 1.25. Выход буровой туннельной машины на поверхность после окончания проходки туннеля (комплекс хранилища ядерных отходов Юкка-Маунтейн)

Рис. 1.26. Строительство полости большого сечения

ГЛАВА 2

Рис. 2.1. Классификация типов хранилищ природного газа

- 1 – соляные полости;
- 2 – отработанные угольные шахты;
- 3 – водоносные пласты горных пород;
- 4 – отработанные нефтяные и газовые месторождения;
- 5 – полости в горных породах.

Рис. 2.2. Расположение хранилищ природного газа на территории США

- 1 – отработанные нефтяные и газовые месторождения;
- 2 – соляные полости;
- 3 – водоносные пласты горных пород.

Рис. 2.4. Формирование купола в соляной толще

- 1 – подача воды;
- 2 – вывод рассола;
- 3 – подача нефти для создания буферной "подушки";
- 4 – цементируемая оболочка;
- 5 – скважина;
- 6 – перекрывающая толща пород;
- 7 – непосредственная кровля соляной толщи;
- 8 – соляная толща;
- 9 – буферная "подушка" из нефтепродуктов ("дизельная");
- 10 – пресная вода;
- 11 – рассол;
- 12 – нерастворимые остатки.

Рис. 2.5. Хранение продуктов в соляной полости

- 1 – подача продукта;
- 2 – рассол;
- 3 – подача азота для изоляции скважины;
- 4 – цементируемая оболочка;
- 5 – перекрывающая толща пород;
- 6 – непосредственная кровля соляной толщи;

- 7 – соляная толща;
- 8 – азотная изоляция;
- 9 – защитный пакер;
- 10 – хранимый продукт;
- 11 – рассол.

Рис. 2.6. Пожар на скважине хранилища Мосс Блаф, Техас

- а) вид с воздуха;
- б) схема аварии в полости хранилища Мосс Блаф;
- в) схема расположения обслуживающих скважин в хранилище большого простирания
- 1 – поврежденная скважина;
- 2 – резервуар хранения газа;
- 3 – район действия газоотсоса.

Рис. 2.8. Общая схема подземного хранилища сжиженного газа

- 1 – главный туннель с полостями хранения;
- 2 – туннель водяной завесы;
- 3 – скважины водяной завесы;
- 4 – горизонты (глубина, м от поверхности);
- 5 – перемычка;
- 6 – уровень грунтовых вод;
- 7 – газообразная фаза пропана;
- 8 – жидкая фаза пропана;
- 9 – вода.

Рис. 2.9. Установка водонепроницаемой перемычки

Рис. 2.10. Строительство полости

Рис. 2.11. Полость хранения сжиженного газа

Рис. 2.15. Хранилище с постоянным уровнем топлива

- 1 – линия подачи топлива в хранилище;
- 2 – линия подачи топлива к потребителю;
- 3 – линия подачи воды в хранилище.

Рис. 2.16. Хранилище с переменным уровнем топлива

Рис. 2.21. Расположение нефтехранилищ, входящих в стратегический нефтяной резерв США

- 1 – штаты;
- 2 – населенные пункты;
- 3 – нефтехранилища.

Рис. 2.22. Расположение полостей-нефтехранилищ в соляном месторождении

- 1 – перекрывающая толща;

2 – полости;

3 – соль.

Рис. 2.23. Динамика увеличения емкости стратегического нефтяного резерва США

1 – возможная производительность откачки, млн. баррелей;

2 – общая емкость хранилища, млн. баррелей.

Рис. 2.25. Подземный силосный бункер

а) общий вид силоса;

б) расположение бункеров на шахте Салмасаари.

Рис. 2.26. Принцип работы подземного силосного бункера

а) схема сравнения территории, используемой для силосного бункера, и обычного закрытого склада А-образной формы на поверхности;

б) погрузочно-разгрузочный механизм бункера (на рисунке изображен один из вариантов конструкции силоса – металлическая структура со внутренней деревянной обшивкой)

Рис. 2.27. Общий вид тепловой электростанции Салмасаари

Рис. 2.28. Схема расположения подземных угольных бункеров

1 – бункера;

2 – туннель для подачи угля к бункерам;

3 – туннель транспортировки угля к блокам электростанции;

4 – подземная установка кондиционирования;

5 – вентиляционные шахты;

6 – вспомогательные туннели для проходки бункеров;

7 – подъездные дороги.

Рис. 2.29. Схема хранения и производства электроэнергии

1 – линия электропередачи;

2 – плотина;

3 – туннель подачи воды;

4 – генераторный зал;

5 – турбинный зал;

6 – поперечное сечение подземной гидроэлектростанции.

Рис. 2.30. Принципиальная схема работы генератора

1 – верхний резервуар;

2 – плотина;

3 – вход воды;

- 4 – контрольные ворота;
- 5 – турбинный водовод;
- 6 – турбины;
- 7 – генератор;
- 8 – трансформатор;
- 9 – машинный зал;
- 10 – выход воды в нижний резервуар;
- 11 – линия электропередачи.

Рис. 2.31. Общая схема подземной структуры гидроаккумулирующей (насосной) электростанции (Динорвиг)

- 1 – головной туннель низкого давления;
- 2 – туннели высокого давления;
- 3 – главный вход в вентильную камеру;
- 4 – машинный зал;
- 5 – вентильная камера;
- 6 – трансформаторный зал;
- 7 – хвостовой туннель;
- 8 – подводящий туннель;
- 9 – строительный подводящий туннель;
- 10 – кабельный туннель;
- 11 – вентиляционная шахта;
- 12 – вентиляционный туннель.

Рис. 2.33. Разрез по подземному комплексу станции Динорвиг

- 1 – верхний резервуар с уровнем воды: 1' – верхним; 1'' – нижним;
- 2 – вход воды;
- 3 – головные ворота;
- 4 – головной туннель низкого давления;
- 5 – амортизирующий пруд;
- 6 – амортизирующая шахта;
- 7 – шахта высокого давления;
- 8 – система высокого давления;
- 9 – машинные залы;
- 10 – система низкого давления;
- 11 – хвостовой туннель;
- 12 – хвостовые ворота;
- 13 – нижний резервуар с уровнями воды: 13' – верхним; 13'' – нижним.

- Рис. 2.34.** Расположение основных объектов станции Динорвиг в окружающем ландшафте (нумерация объектов соответствует нумерации рисунка 2.33)
- Рис. 2.35.** Верхний и нижний резервуары станции Динорвиг
 а) верхний;
 б) нижний.
- Рис. 2.36.** Генераторный зал станции Динорвиг
- Рис. 2.37.** Турбинный зал станции Динорвиг
- Рис. 2.38.** Вид с воздуха гидроэлектростанции Круонис
- Рис. 2.39.** Поверхностный комплекс гидроэлектростанции Окинава с использованием моря в качестве нижнего резервуара
- Рис. 2.40.** Схема комплекса туннелей и полостей подземной гидроэлектростанции с использованием искусственно сооруженных полостей в качестве нижнего резервуара
 1 – верхний резервуар (море);
 2 – головной туннель;
 3 – машинный зал;
 4 – нижний резервуар.
- Рис. 2.42.** Поверхностный комплекс электростанции Барги с подачей воды к турбине по стальным трубам
- Рис. 2.45.** Изометрическая схема комплекса туннелей и полостей подземной гидроэлектростанции
 1 – головной туннель;
 2 – головная сглаживающая емкость;
 3 – наклонные шахты подачи воды;
 4 – машинный зал;
 5 – амортизирующая емкость;
 6 – хвостовой туннель;
 7 – подводящий туннель.
- Рис. 2.46.** Разрез по комплексу подземной гидроэлектростанции
 1 – верхний резервуар;
 2 – входная шахта;
 3 – турбинный зал;
 4 – трансформаторный зал;
 5 – амортизирующая емкость;
 6 – лифт;
 7 – подводящий туннель;

- 8 – нижний резервуар;
- 9 – распределительная сеть;
- 10 – административное здание

Рис. 2.51. Строительство главного машинного зала подземной электростанции Нью-Скджерка

Рис. 2.55. Нагнетание сжатого воздуха в полость

- 1 – избыточная электроэнергия, направляемая на сжатие воздуха;
- 2 – воздух, поступающий в компрессор;
- 3 – воздух, закачиваемый в полость хранения;
- 4 – полость;
- 5 – сжатый воздух в полости;
- 6 – соляное месторождение;
- 7 – двигатель;
- 8 – компрессор;
- 9 – рекуператор;
- 10 – турбины;
- 11 – генератор;
- 12 – природный газ, подогревающий при сгорании воздух для увеличения его объема

Рис. 2.56. Возврат сжатого воздуха из полости хранения к электростанции

- 1 – использование хранимого воздуха для выработки электроэнергии;
- 2 – отвод тепла отработанного воздуха рекуператором;
- 3 – выброс;
- 4 – доставка произведенной электроэнергии в общую сеть.

Рис .2.57. Порядок подготовки полости в соляном слое

- 1 – бурение скважины;
- 2 – начало процесса растворения соли;
- 3 – продолжение процесса растворения;
- 4 – завершение процесса растворения;
- 5 – замена рассола сжатым воздухом;
- 6 – хранение воздуха.

Рис. 2.58. Вид с воздуха на электростанцию Хантдорф

- 1 – полости;
- 2 – здание электростанции.

Рис. 2.61. Подготовка бывшей известняковой шахты к хранению сжатого воздуха

Рис. 2.62. Системы подземного хранения тепла

а) система хранения тепла в водоносном слое АТЭС;

1 – зима;

2 – лето;

3 – тепло;

4 – холод;

5 – теплообменник;

6 – уровень грунтовых вод;

7 – водоносный слой;

8 – теплый колодец;

9 – холодный колодец;

10 – вентиляция;

б) трубопроводная система хранения тепла DTES;

1 – тепловой контур;

2 – тепловой насос;

3 – теплоноситель;

4 – скважины;

5 – охлаждение воздуха летом.

Рис. 2.63. Схема работы теплообменника

1 – теплообменник;

2 – геотермальная вода, поступающая из теплого колодца;

3 – остывшая вода, поступающая в холодный колодец;

4 – холодная вода, поступающая из городских сетей для обогрева;

5 – вода, нагретая в теплообменнике и направляемая к обогреваемым объектам.

Рис. 2.64. Хранение снега для охлаждения городских районов

1 – грунт;

2 – коренные породы;

3 – вода.

ГЛАВА 3

Рис. 3.1. Горный массив Юкка Маунтейн

Рис. 3.2. Схема подземного расположения хранилища радиоактивных отходов

- Рис. 3.3. Схема расположения главного туннеля (туннельной петли) в горном массиве**
1 – главный туннель;
2 – разведочный туннель.
- Рис. 3.4. Расположение комплекса Юкка Маунтейн на территории США и штата Невада**
- Рис. 3.5. Совмещенная схема горного массива и подземного хранилища**
1 – главный туннель;
2 – разведочный туннель;
3 – панели хранения отходов.
- Рис. 3.6. Вид со спутника на площадку комплекса Юкка Маунтейн**
- Рис. 3.7. Совмещенная схема геологических формаций и главного туннеля**
1 – северный портал;
2 – южный портал;
3 – геологическая формация размещения хранилища;
4 – гребень горного массива.
- Рис. 3.8. Геологический разрез в районе строительства хранилища Юкка Маунтейн**
1 – геологические формации;
2 – геологические нарушения;
3 – горизонт расположения хранилища.
- Рис. 3.9. Передвижная геологическая лаборатория**
- Рис. 3.10. Начало проходки разведочного туннеля буровой туннельной машиной**
- Рис. 3.11. Окончание проходки разведочного туннеля буровой туннельной машиной**
- Рис. 3.12. Проходка ответвлений и ниш туннеля проходческим комбайном**
- Рис. 3.13. Разведочный туннель после установки металлической крепи**
- Рис. 3.14. Установка анкерных болтов и металлической сетки для крепления туннеля**
- Рис. 3.17. Конструкция транспортных туннелей и туннелей хранения**
- Рис. 3.20. Расположение контейнеров с отходами в туннеле хранения**

- 1 – контейнеры с отходами;
- 2 – защитная оболочка;
- 3 – рельсовый путь порталного крана;
- 4 – стальная структура;
- 5 – металлическая крепь туннеля.

Рис. 3.21. Комплекс поверхностных зданий и сооружений ВИПП

Рис. 3.22. Карта расположения хранилища ВИПП

Рис. 3.23. Геологическое строение района расположения ВИПП

- 1 – формация Santa Rosa;
- 2 – формация Dewey Lake Redbeds;
- 3 – формация Rustler;
- 4 – формация Salado;
- 5 – формация Castile;
- 6 – место расположения хранилища;
- 7 – вертикальные стволы;
- 8 – геологоразведочная скважина.

Рис. 3.24. Совмещенная схема поверхности и подземного комплекса хранилища

- 1 – ствол для спуска радиоактивных отходов;
- 2 – ствол для выполнения грузоподъемных операций при строительстве;
- 3 – воздухоподающий ствол;
- 4 – вентиляционный ствол;
- 5 – панели хранения отходов;
- 6 – помещение хранения отходов;
- 7 – поверхностный комплекс.

Рис. 3.25. Схема подземного комплекса хранилища

- 1-4 – вертикальные стволы (см. рис. 3.24);
- 5 – панели с помещениями хранения отходов;
- 6 – помещение хранения отходов;
- 7 – позиция показана на рис. 3.24;
- 8 – планируемые панели;
- 9 – построенные панели.

Рис. 3.26. Туннель панелей хранения отходов

Рис. 3.27. Контейнеры с отходами в помещении хранения

Рис. 3.28. Комплекс подземного хранения SFR (Швеция)

Рис. 3.29. Горизонтальные хранилища комплекса SFR

Рис. 3.30. Вертикальная скважина для хранения канистр с отходами в комплексе SFR

Рис. 3.31. Вертикальный силос комплекса SFR

Рис. 3.32. Комплекс подземного хранилища CLAB (Швеция)

1 – предварительное охлаждение прибывших отходов;

2 – размещение отходов в канистрах хранения;

3 – охлаждение канистр с отходами;

4 – спуск канистр специальным лифтом в бассейн;

5 – вмуровывание канистр в бетон для окончательного захоронения.

Рис. 3.33. Схема глубокого хранения отходов среднего уровня радиоактивности (Швеция)

Рис. 3.35. Подземное хранилище Окилкуото (Финляндия)

а) общий вид;

б) вертикальные бункера.

Рис. 3.36. Схема хранилища Ловииса (Финляндия)

Рис. 3.38. Комплекс хранилища Опалинус (Швейцария)

Рис. 3.39. Европейская концепция подземного хранения отходов с высоким уровнем радиоактивности

Рис. 3.40. Японская концепция подземного хранения отходов с высоким уровнем радиоактивности

Рис. 3.41. Подземный комплекс лаборатории Хоронобе (Япония)

Рис. 3.42. Подземный комплекс лаборатории Франции

Рис. 3.43. Подземный комплекс лаборатории Онкало (Финляндия)

Рис. 3.48. Зона пород, примыкающих к туннелю хранения, нарушенных горными работами

1 – порода;

2 – трещина в породе;

3 – подстилающие материалы в породных порых;

4 – зона кипения воды;

5 – пар;

6 – зона конденсации пара;

7 – зона растворения минералов;

8 – стекающая вода.

Рис. 3.49. Общая схема движения пароводяного потока в породах, перекрывающих туннель хранения отходов

1 – радиоактивные отходы;

- 2 – перегретая зона;
- 3 – зона кипения воды;
- 4 – направление движения пара;
- 5 – зона конденсации пара;
- 6 – направление движения воды;
- 7 – орошаемая зона.

Рис. 3.50. Образование уплотненных куполов горных пород в своде туннелей хранения отходов

- а) поперечный разрез;
- б) продольный разрез;
- 1 – туннель;
- 2 – глубина под уровнем поверхности;
- 3 – доли первоначальной пористости пород.

ГЛАВА 4

Рис. 4.4. Географическая схема комплекса Фермилаб

- 1 – главный инжектор;
- 2 – ускоритель элементарных частиц;
- 3 – подземный комплекс проекта NUMI-MINOS.

Рис. 4.5. Вид с воздуха на комплекс Фермилаб

Рис. 4.6. Секция подземной установки линейного ускорителя лаборатории Фермилаб

Рис. 4.7. Схема проекта NUMI-MINOS – траектория частиц между лабораториями Фермилаб и Саудан

- а) план траектории:
- MO – штат Миссури;
- IL – штат Иллинойс;
- IN – штат Индиана;
- IA – штат Айова;
- WI – штат Висконсин;
- MI – штат Мичиган;
- MN – штат Миннесота;
- б) разрез по траектории.

Рис. 4.8. План и разрез подземного комплекса NUMI-MINOS

- а) план;
- б) разрез;
- 1 – зал выброса пучка частиц (Extraction Hall);
- 2 – туннель (Carrier Tunnel) (3x3 м);

- 3 – зал мишени (Target Hall) (ширина 7,6 м, высота 9-18 м, длина 53 м);
- 4 – туннель распада (Decay Tunnel) (диаметр 7 м);
- 5 – здание обслуживания мишени (Target Service);
- 6 – шахта мишени (Target Shaft);
- 7 – шахта вывода воздуха;
- 8 – абсорбирование частиц (Beam Absorber);
- 9 – детекторы мюонов (Muon Detectors);
- 10 – здание обслуживания детектора MINOS (MINOS Service Building);
- 11 – шахта детектора MINOS (MINOS Shaft) (глубина 103 м);
- 12 – туннель зала MINOS (MINOS Hall Tunnel);
- 13 – зал MINOS (ширина 10,7 м, высота 9,8 м, длина 46 м);
- 14 «ближний» детектор MINOS (MINOS Near Detector).

Рис. 4.9. Монтаж детектора NuMi

Рис. 4.10. Туннель распада (Decay Tunnel) лаборатории Фермилаб

Рис. 4.11. Схема подземного лабораторного комплекса Саудан-2 (27 горизонт шахты)

- 1 – существующий ствол;
- 2 – существующая полость;
- 3 – полость «дальнего» детектора MINOS;
- 4 – схема детектора MINOS.

Рис. 4.12. Строительство полости «дальнего» детектора MINOS в шахте Саудан

Рис. 4.13. Подземная полость лаборатории Саудан, закрепленная анкерными болтами

Рис. 4.14. Детектор MINOS в шахте Саудан

Рис. 4.15. Монтаж оборудования в лаборатории Саудан-2

Рис. 4.17. Размещение оборудования в зале мишени («Target Hall») лаборатории Фермилаб

Рис. 4.18. Общий вид поверхности шахты Хоумстейк

- 1 – ствол Ятес;
- 2 – ствол Росс.

Рис. 4.19. Схема вскрытия месторождения шахты Хоумстейк

- 1 – ствол Ятес;
- 2 – ствол Росс;

- 3 – старый ствол №2;
- 4 – «слепые» грузоподъемные стволы;
- 5 – воздухоподающий ствол;
- 6 – вентиляционная скважина;
- 7 – вентиляционные стволы;
- 8 – вспомогательный ствол;
- 9 – бункера.

Рис. 4.20. Схема вскрытия рудного тела участковыми выработками

- 1 – рудное тело;
- 2 – продольные погоризонтные туннели;
- 3 – поперечные выемочные участковые туннели.

Рис. 4.28. Общий вид полости большого размера, закрепленной анкерной крепью с поддерживающей сеткой

Рис. 4.31. Кряж Сан-Джасинто в месте расположения туннеля, подводящего к подземной лаборатории

- 1 – изверженные породы;
- 2 – метаморфизованные породы;
- 3 – осадочные породы;
- 4 – пик Сан-Джасинто;
- 5 – примерное направление туннеля.

Рис. 4.32. Совмещенные топографическая и геологическая карты участка проходки туннеля к лаборатории Сан-Джасинто

- 1 – портал;
- 2 – направление трассы туннеля;
- 3 – нижняя станция подвесной канатной дороги;
- 4 – направление трассы канатной дороги;
- 5 – верхняя станция канатной дороги.

Рис. 4.33. Геологический разрез по трассе туннеля Сан-Джасинто

- 1 – осадочные породы;
- 2 – метаморфизованные породы;
- 3 – изверженные породы;
- 4 – направление туннеля;
- 5 – дно каньона;
- 6 – профиль северного горного гребня;
- 7 – долина, прилегающая к кряжу Сан-Джасинто;
- 8 – жилой поселок;

- 9 – нижняя станция подвесной канатной дороги;
- 10 – верхняя станция канатной дороги.

Рис. 4.34. Профиль горного гребня в месте расположения лабораторного туннеля

- 1 – пик Сан-Джасинто;
- 2 – портал туннеля;
- 3 – нижняя станция подвесной канатной дороги;
- 4 – верхняя станция подвесной канатной дороги;
- 5 – высота над уровнем моря, м.

Рис. 4.37. Макет одного из вариантов подземных помещений лаборатории Сан-Джасинто

Рис. 4.38. Интерьер одного из подземных помещений лаборатории Сан-Джасинто

Рис. 4.39. Вход (портал) в туннель шахты Мозуми (лаборатория Камиока)

Рис. 4.40. Схема расположения научных комплексов в подземных выработках шахты Мозуми (лаборатория Камиока)

- а) расположение детекторов KamLAND и «Суперкамиоканде»;
- б) общий вид детектора KamLAND;
- в) общий вид перспективного детектора «Гиперкамиоканде»;
- 1 – фотоумножители;
- 2 – обшивка;
- 3 – платформа;
- 4 – непроницаемый лист;
- 5 – наружный детектор;
- 6 – внутренний детектор.

Рис. 4.41. Схема установки детектора KamLAND в шахте Мозуми

Рис. 4.42. Монтажные работы в камере детектора KamLAND

Рис. 4.43. Детектор KamLAND в подземной полости шахты Мозуми

Рис. 4.44. Схема устройства и работы детектора «Суперкамиокаде»

- 1 – каждые 90 мин нейтрино попадает в камеру детектора, генерируя Черенковское излучение. При этом создается световой конус, регистрируемый фотоум-

ножителями, расположенными в емкости с водой. Это позволяет определить, какие виды нейтрино зарегистрированы и в каком направлении они двигаются;

- 2 – емкость 50 тыс. м³ сверхчистой воды;
- 3 – свет улавливается фотоумножителями, уложенными в емкость, и трансформируется в цифровое изображение;
- 4 – толща горы отфильтровывает другие сигналы, которые маскируют признаки нейтрино;
- 5 – несколько нейтрино, попадая в емкость сверхчистой воды, генерируют световой конус;
- 6 – электронное оборудование;
- 7 – контрольное помещение;
- 8 – подводный туннель длиной 2 км.

Рис. 4.45. Подземная полость для размещения детектора «Суперкамиокаде»

Рис. 4.46. Детектор «Суперкамиокаде». Вид изнутри

Рис. 4.47. Вид с воздуха на промплощадку шахты Пихасалми и прилегающий ландшафт

Рис. 4.48. Карта Финляндии с расположением г. Пихаярви и шахты Пихасалми

Рис. 4.49. Полость на гор. 210 м шахты Пихасалми

Рис. 4.50. Комплекс вскрывающих выработок существующей и новой (углубляемой) частей шахты Пихасалми

Рис. 4.51. Вскрытие нижней части месторождения шахты Пихасалми

- 1 – горизонт 1100 м;
- 2 – горизонт 1200 м;
- 3 – горизонт 1300 м;
- 4 – горизонт 1400 м.

Рис. 4.52. Перспективный комплекс научных лабораторий на гор. 1440 м

- а) общий вид;
- б) привязка научного комплекса к горным выработкам горизонта;
- 1 – рудное тело;
- 2 – новый вертикальный ствол;
- 3 – лабораторный комплекс.

Рис. 4.53. Расположение научных комплексов различного назначения на действующих горизонтах шахты Пихасалми

- 1 – горизонт 90 м;
- 2 – горизонт 210 м;
- 3 – горизонт 270 м (слева) и горизонт 300 м (справа);
- 4 – горизонт 400 м;
- 5 – горизонт 660 м;
- 6 – горизонт 970 м.

Рис. 4.54. Промышленная площадка шахты Балби

Рис. 4.55. Главный зал подземной физической лаборатории шахты Балби

Рис. 4.56. Установка детекторов обнаружения «темной» материи в выработках шахты Балби

- а) расстановка детекторов различных типов в лаборатории;
- б) этапы строительства лаборатории в горных выработках;
- 1 – главная подземная лаборатория;
- 2 – детекторы обнаружения «темной» материи.

Рис. 4.57. Схема вскрывающих горных выработок шахты Балби и подземной физической лаборатории

- 1 – шахтные стволы;
- 2 – космические лучи, остановленные горными породами;
- 3 – частицы «темной» материи, проникающие в подземную лабораторию;
- 4 – экспериментальная полость;
- 5 – защитная оболочка чистой воды, окружающая детекторы;
- 6 – крепь подземной полости;
- 7 – контрольное помещение.

Рис. 4.58. Установка детектора Zepin в подземной лаборатории

Рис. 4.59. Ученые в шахте Балби

Рис. 4.66. Промышленная площадка шахты Крайтон

Рис. 4.67. Схема вскрытия шахты Крайтон

Рис. 4.69. Горные выработки лабораторного комплекса шахты Крайтон

- а) общая схема;

- б) вход в лабораторию;
- в) полость детектора SNO с примыкающими выработками;
- 1 – полость детектора;
- 2 – туннель питания и переодевания персонала;
- 3 – вход в лабораторию;
- 4 – туннель вспомогательного оборудования;
- 5 – мойка машин;
- 6 – «грязная» зона.

Рис. 4.70. Привязка лабораторного комплекса к существующим горным выработкам шахты Крайтон

- а) общая схема;
- б) лабораторный комплекс;
- в) схема детектора SNO;
- г) типичное сечение туннеля;
- 1 – существующий лабораторный комплекс;
- 2 – перспективный лабораторный комплекс;
- 3 – существующие выработки шахты;
- 4 – хранилище тяжелой воды;
- 5 – пункт фильтрации воды;
- 6 – пункт фильтрации тяжелой воды;
- 7 – полость детектора SNO;
- 8 – акриловый сосуд;
- 9 – промежуточный склад детектора SNO;
- 10 – помещение персонала;
- 11 – вход;
- 12 – помещение переодевания персонала;
- 13 – пункт зарядки батарей;
- 14 – пункт питания.

Рис. 4.71. Схема горных выработок и полостей перспективного лабораторного комплекса (размеры в футах, 1 фут = 0,3048 м) шахты Крайтон

- 1 – фаза 1 перспективного комплекса;
- 2 – фаза 2 перспективного комплекса;
- 3 – прямоугольный зал;
- 4 – зона подготовки;
- 5 – контрольная комната;
- 6 – «лестничная» лаборатория;
- 7 – охлаждающий колодец;

8 – герметическая дверь;

Рис. 4.72. Схема лабораторных комплексов (существующего и перспективного) шахты Крайтон

1 – существующие выработки шахты;

2 – существующий лабораторный комплекс;

3 – полость детектора SNO;

4 – фаза 1 перспективного лабораторного комплекса;

5 – фаза 2 перспективного лабораторного комплекса;

6 – прямоугольный зал;

7 – охлаждающий колодец;

8 – «лестничная» лаборатория.

Рис. 4.73. Схема нейтринного детектора SNO лаборатории Садбэри

Рис. 4.74. Наружный вид детектора SNO

Рис. 4.75. Монтаж детектора SNO

Рис. 4.76. Стадии проходческих работ по сооружению камеры детектора SNO

Рис. 4.77. Стадии монтажа детектора: сферической оболочки (красный цвет) и акрилового сосуда (зеленый цвет)

Рис. 4.78. Проходка камеры детектора

Рис. 4.79. Вспомогательный туннель

Рис. 4.80. Расположение и состав лаборатории Грэн Сэссо

а) расположение туннеля и лаборатории в горном массиве;

б) план и изометрическое изображение лабораторного комплекса;

в) интерьер зала С;

1 – туннель интерферометра;

2 – зал А;

3 – зал В;

4 – зал С;

5 – автодорожный туннель.

Рис. 4.81. Схемы расположения оборудования в лабораторных залах

а) общий вид;

б) сечение лабораторного зала.

Рис. 4.82. Схема совместных экспериментов ускорителя CERN и лаборатории Грэн Сэссо

Рис. 4.83. Интерьер зала А лаборатории Грэн Сэссо

Рис. 4.85. Интерьер зала С. Монтажные работы

Рис. 4.86. Общий вид детектора Борексина лаборатории Грэн Сэссо

- а) размещение детектора;
- б) изометрическая схема детектора.

Рис. 4.87. Сооружение лабораторной полости (лаборатория Грэн Сэссо)

Рис. 4.88. Проходка полости буровзрывным способом (лаборатория Грэн Сэссо)

Рис. 4.89. Проходка полости комбайном (лаборатория Грэн Сэссо)

Рис. 4.90. Общая схема ускорителя LEP/LHC (подземные работы)

Point 1 - point 8 – пункты установки оборудования. Красным цветом выделены объекты реконструкции и модернизации

Рис. 4.91. Схема кольца синхротрона SPS

Рис. 4.92. Панорама расположения комплекса ускорителя LEP/LHC

Рис. 4.97. Схемы туннелей T12 и T18 при реконструкции комплекса ускорителя LEP/LHC

- а) план туннеля T12;
- б) разрез по туннелю T12;
- 1 – кольцо ускорителя LEP/LHC;
- 2 – кольцо синхротрона SPS;
- 3 – новый туннель T12;
- 4 – пункт 1 ускорителя LEP/LHC;
- 5 – пункт 2 ускорителя LEP/LHC;
- 6 – вспомогательная шахта PM12;
- в) план туннеля T18;
- г) разрез по туннелю T18;
- 1 – кольцо ускорителя LEP/LHC;
- 2 – кольцо синхротрона SPS;
- 3 – новый туннель T18;
- 4 – соединение туннеля T18 с туннелем синхротрона SPS;
- 5 – вспомогательная шахта PGC8;
- 6 – пункт 8 ускорителя LEP/LHC;

7 – соединение туннеля T18 с туннелем ускорителя LEP/LHC.

Рис. 4.98. Монтаж оборудования в полости ускорителя LEP/LHC

Рис. 4.99. Участок туннеля ускорителя со смонтированным оборудованием

Рис. 4.100. Вид с поверхности на устье вертикальной шахты

Рис. 4.101-4.102. Сооружение сопряжения вертикальной шахты с экспериментальной полостью

Рис. 4.103. Установка анкерной крепи в сопряжении вертикальной шахты с экспериментальной полостью

Рис. 4.104. Строительство полости UX15 детектора ATLAS

- а) формирование свода полости;
- б) временный породный целик для поддержания свода полости

Рис. 4.105. Схема последовательности проходки полости UX15 детектора ATLAS

- а) очередность проходческих работ;
 - б) фазы строительства;
- I – туннель ускорителя LEP/LHC;
II – шахта доступа PX 14;
III – примыкающая полость USA 15;
IV – существующая полость US 15.

Рис. 4.106. Строительство полости UX15 детектора ATLAS

- а) общий вид полости;
- б) 1-я фаза строительства полости (в кровле полости видна шахта доступа).

Рис. 4.107. Подвеска кровли полости на анкерных канатах

- а) общая схема подвески;
 - б) разрез по полости детектора, шахте доступа и боковым галереям;
- 1 – боковые анкерные галереи;
2 – шахта доступа PX 16;
3 – полость детектора US 15;
4 – туннель ускорителя LEP/LHC.

Рис. 4.108. Комплекс CMS в пункте 5

- а) размещение оборудования в детекторной и компьютерной полостях;
- 1 – полость детектора CMS;

- 2 – компьютерная полость;
- 3 – оптические каналы;
- 4 – кабельные каналы;
- 5 – балконы обслуживания оборудования;
- б) модель напряженных зон в горных породах, окружающих комплекс параллельных полостей CMS.

Рис. 4.109. Камера одного из магнитов ускорителя LEP/LHC

Рис. 4.110. Совместный эксперимент ускорителя CERN с лабораторией Грэн Сэссо

- а) карта-схема;
- б) разрез.

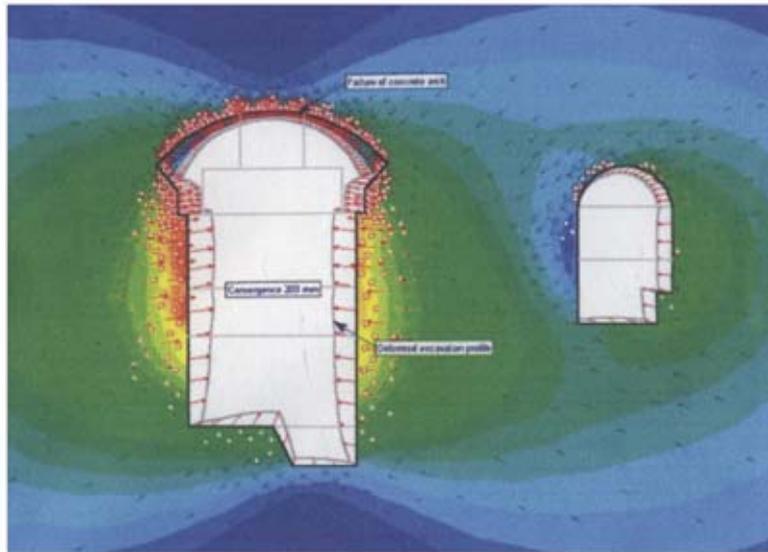
Рис. 4.111. Подземные сооружения совместного эксперимента ускорителя CERN с лабораторией Грэн Сэссо

- а) план туннелей существующих (ускорителя LEP/LHC) и необходимых для совместного эксперимента;
- б) разрез по подземным сооружениям комплекса CERN – Грэн Сэссо;
- 1 – существующий комплекс туннеля ускорителя LEP/LHC;
- 2 – комплексы шахты доступа к туннелю;
- 3 – временная шахта;
- 4 – подводная галерея;
- 5 – камера мишени;
- 6 – туннель протонового пучка;
- 7 – туннель распада протонов;
- 8 – соединяющая галерея;
- 9 – камеры детекторов;
- 10 – направление нейтронного пучка к Грэн Сэссо;
- 11 – моренные отложения;
- 12 – осадочные породы молассы.

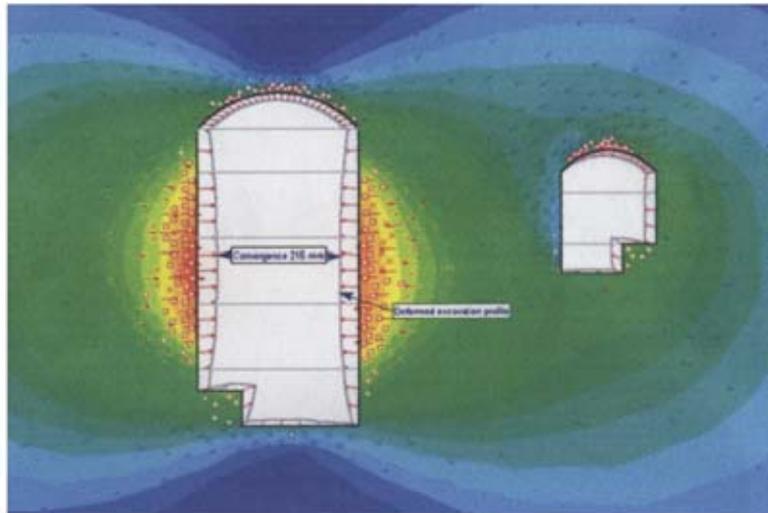


**Рис. 1.6. Изометрическая модель расположения подземного комплекса
Мингтан и нарушенных зон**

a)



b)



в)

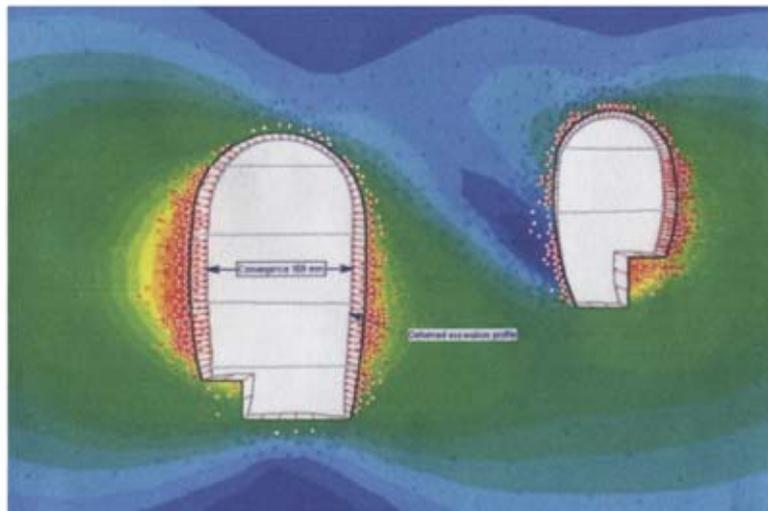


Рис. 1.7. Варианты формы сечений машинных залов гидростанции Мингтан

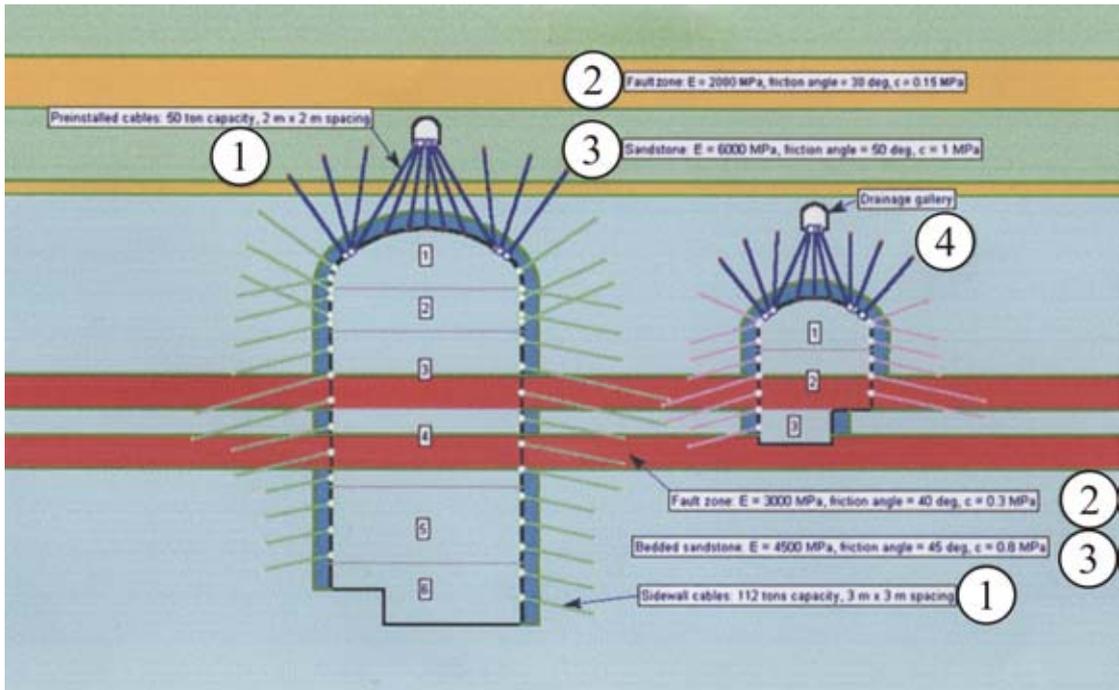


Рис. 1.8. Цифровая модель, показывающая схему необходимого усиления анкерной крепью пород, окружающих полости

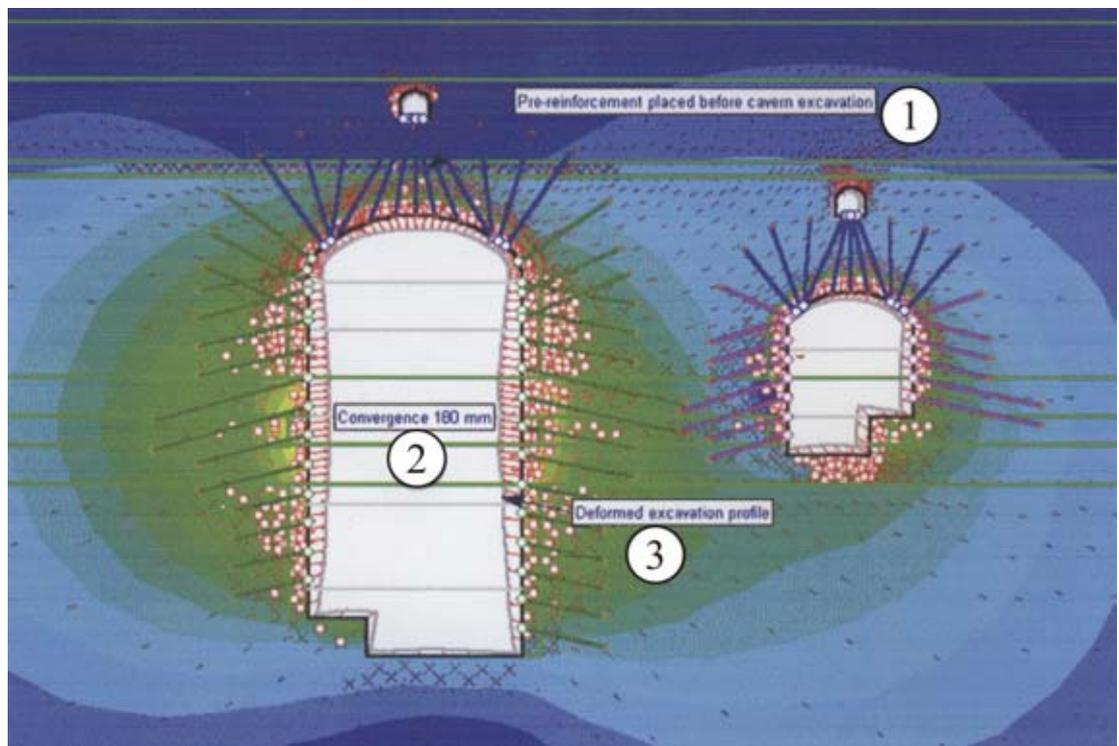


Рис. 1.9. Цифровая модель, показывающая потерю несущей способности породного массива и деформацию контуров полости

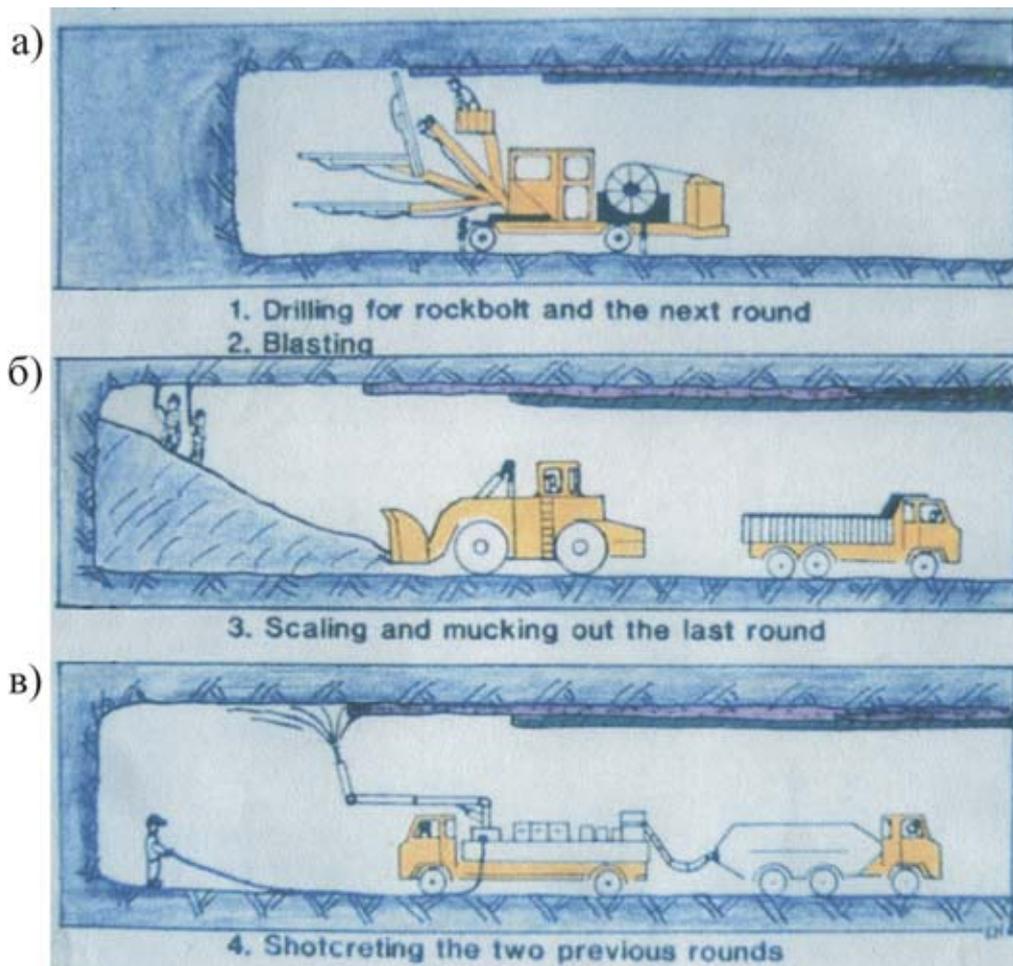


Рис. 1.13. Последовательность операций при проходке подземной полости буровзрывным способом



Рис. 1.14. Расположение оборудования при бурении скважин

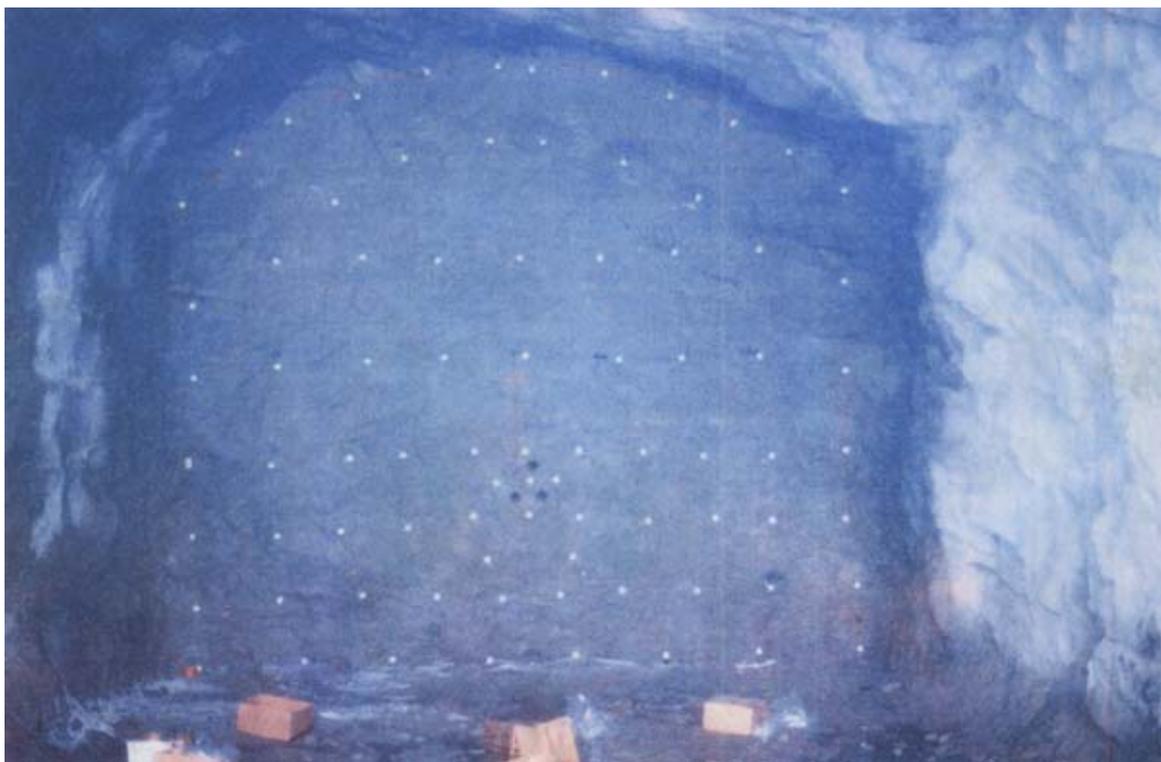


Рис. 1.15. Скважины в забое полости, подготовленные для последующего заряжания взрывным веществом



Рис. 1.17. Подземная полость после проведения взрывных работ



Рис. 1.18. Окончание формирования арочной кровли подземной выработки



Рис. 1.23. Работы по нанесению набрызгбетона

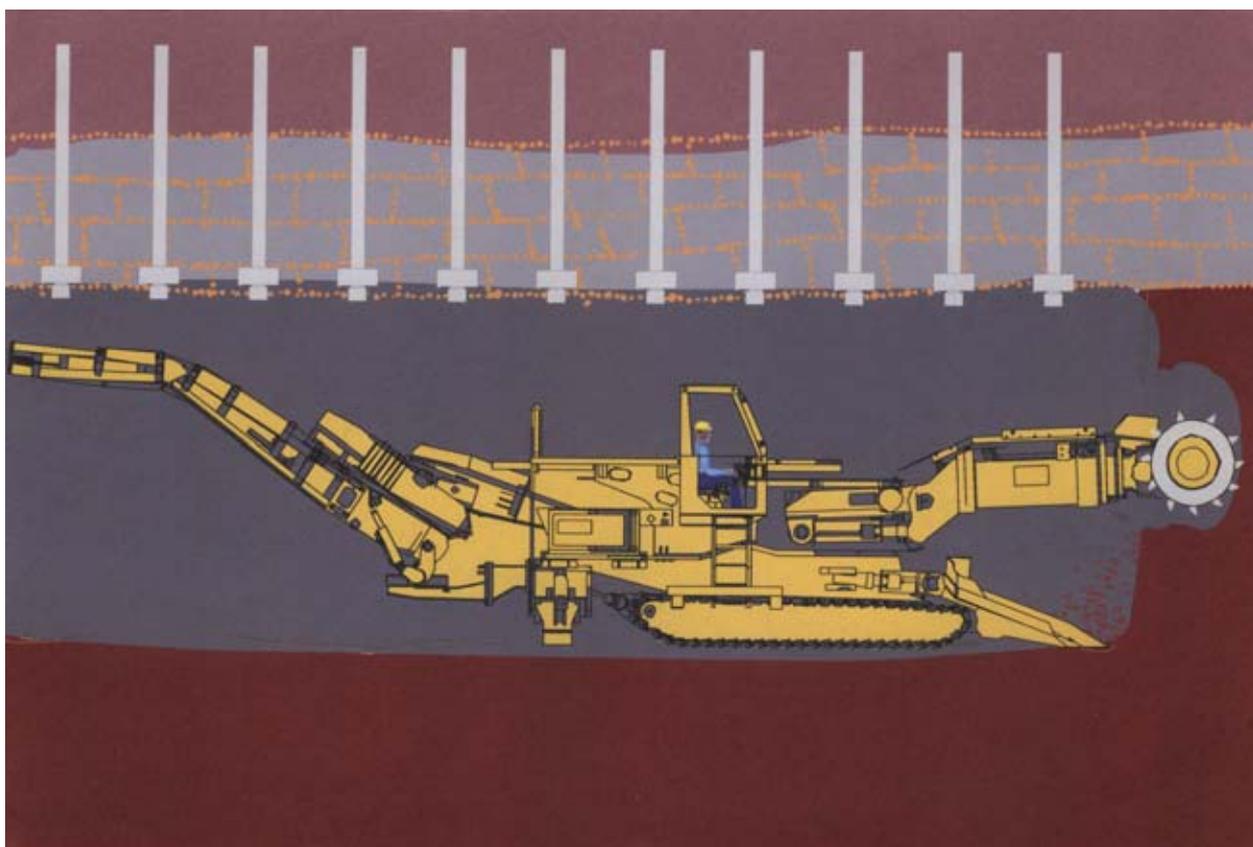


Рис. 1.24. Схема работы проходческого комбайна



Рис. 1.25. Выход буровой проходческой машины на поверхность после окончания проходки туннеля (комплекс хранилища ядерных отходов Юкка-Маунтейн)



Рис. 1.26. Строительство выработки большого сечения

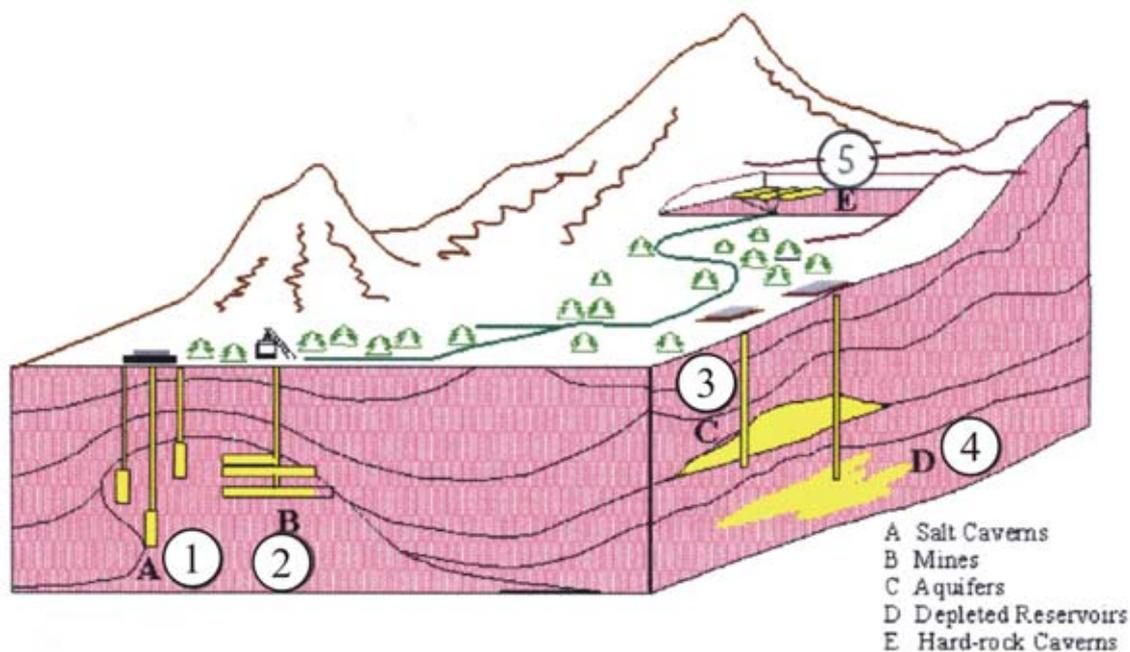


Рис. 2.1. Классификация типов хранилища природного газа

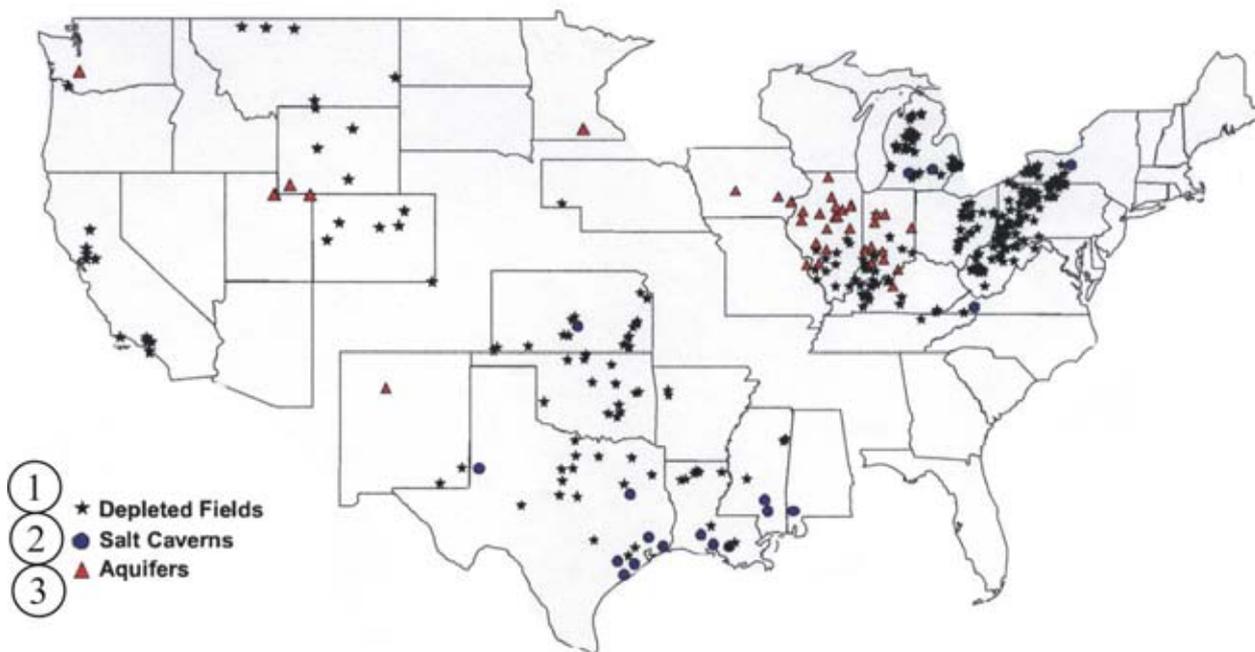


Рис. 2.2. Расположение хранилищ природного газа на территории США

SOLUTION MINING WELL

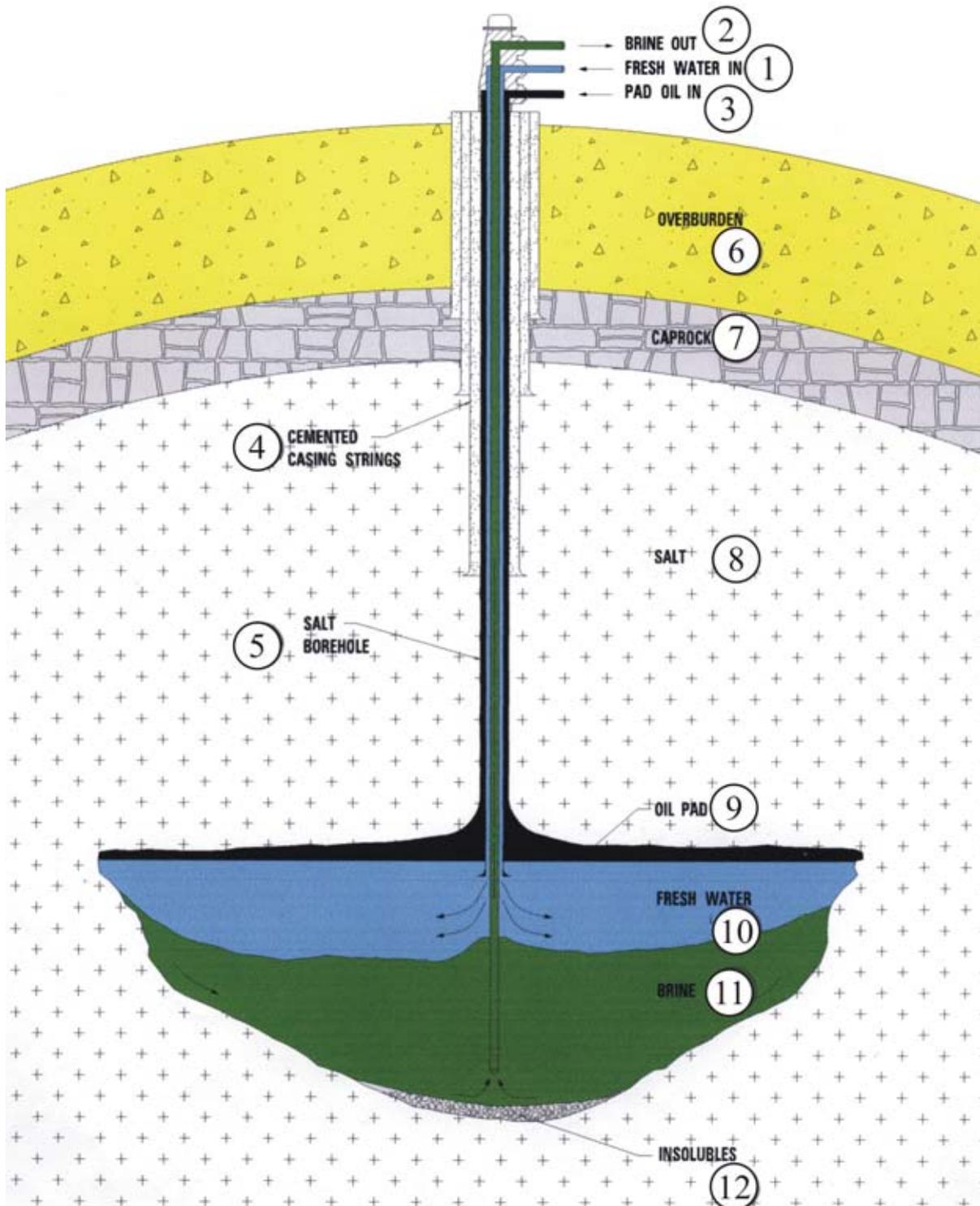


Рис. 2.4. Формирование купола в соляной толще

STORAGE WELL

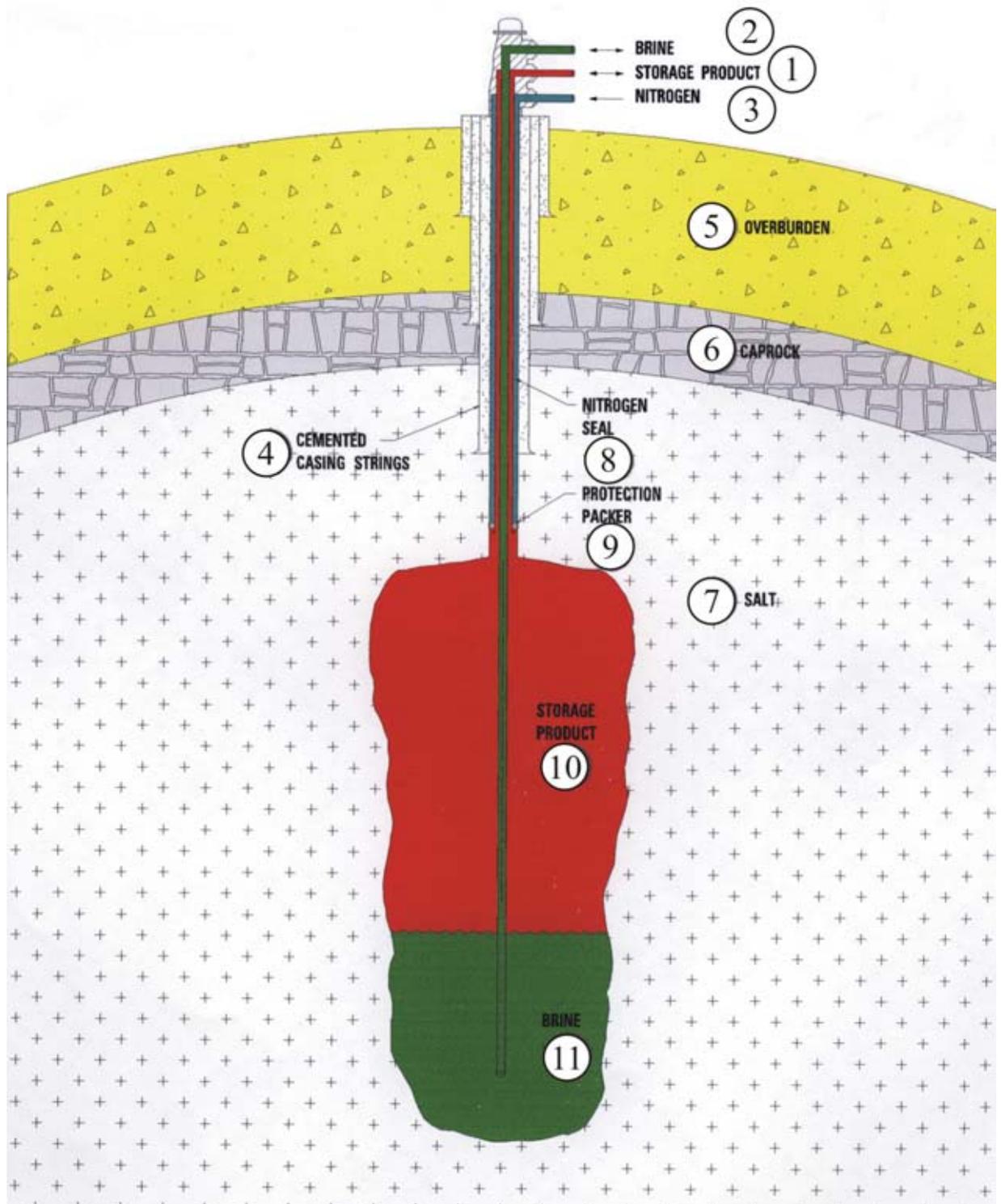
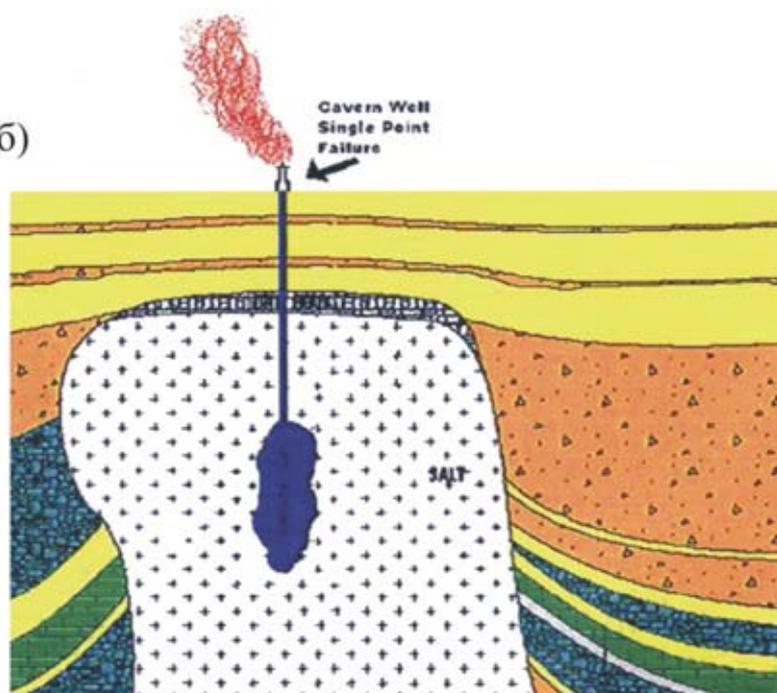


Рис. 2.5. Хранение продуктов в соляной полости

a)



b)



B)

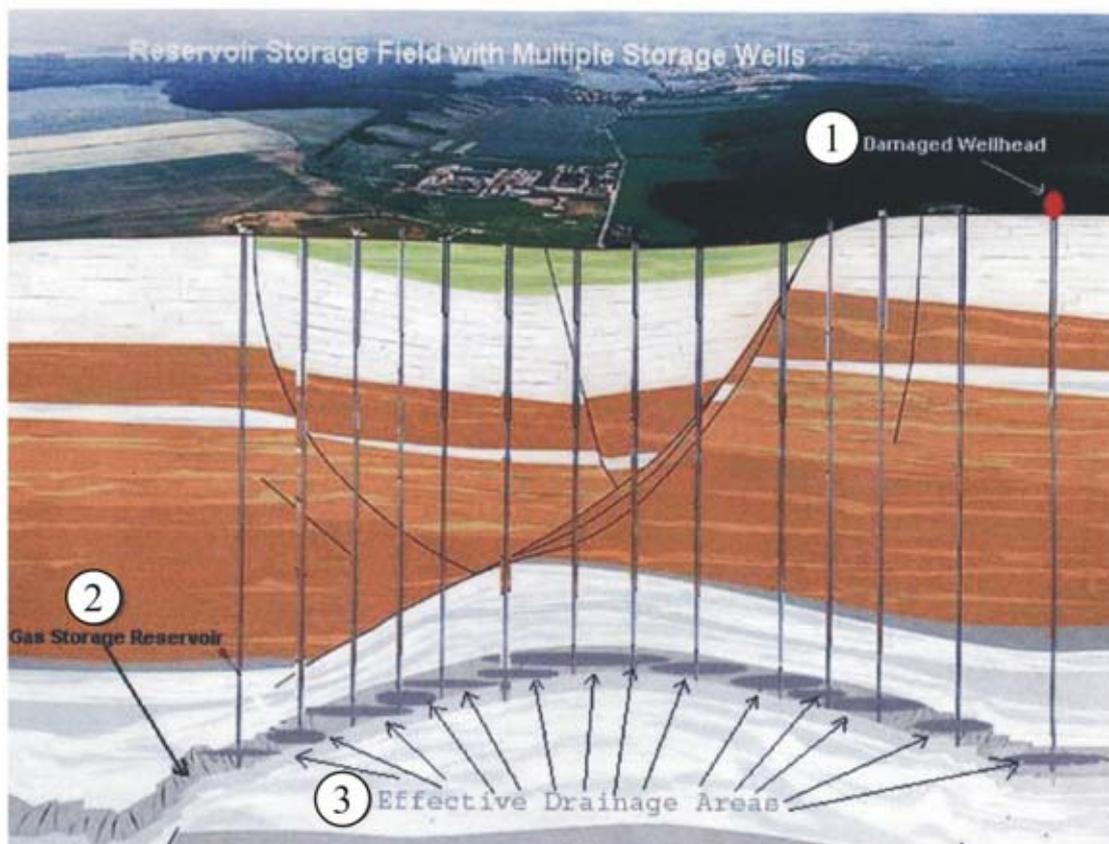


Рис. 2.6. Пожар на скважине хранилища Мосс Блаф, Техас

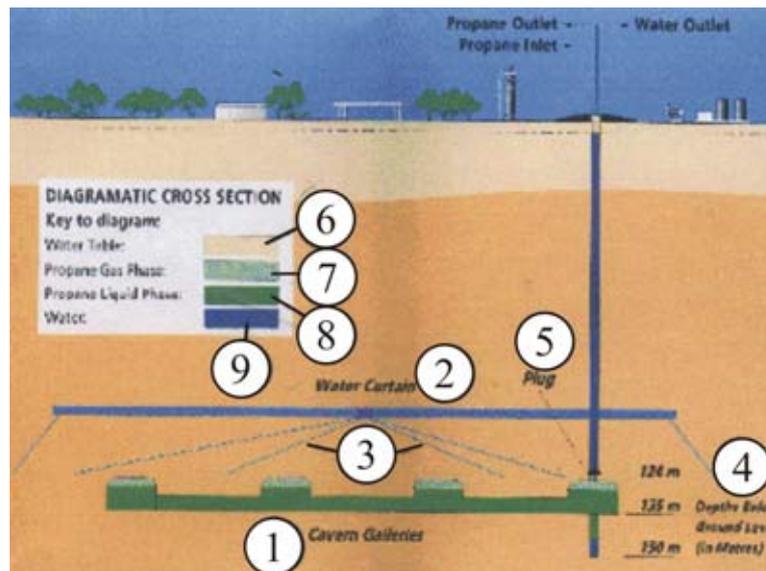


Рис. 2.8. Общая схема подземного хранилища сжиженного газа

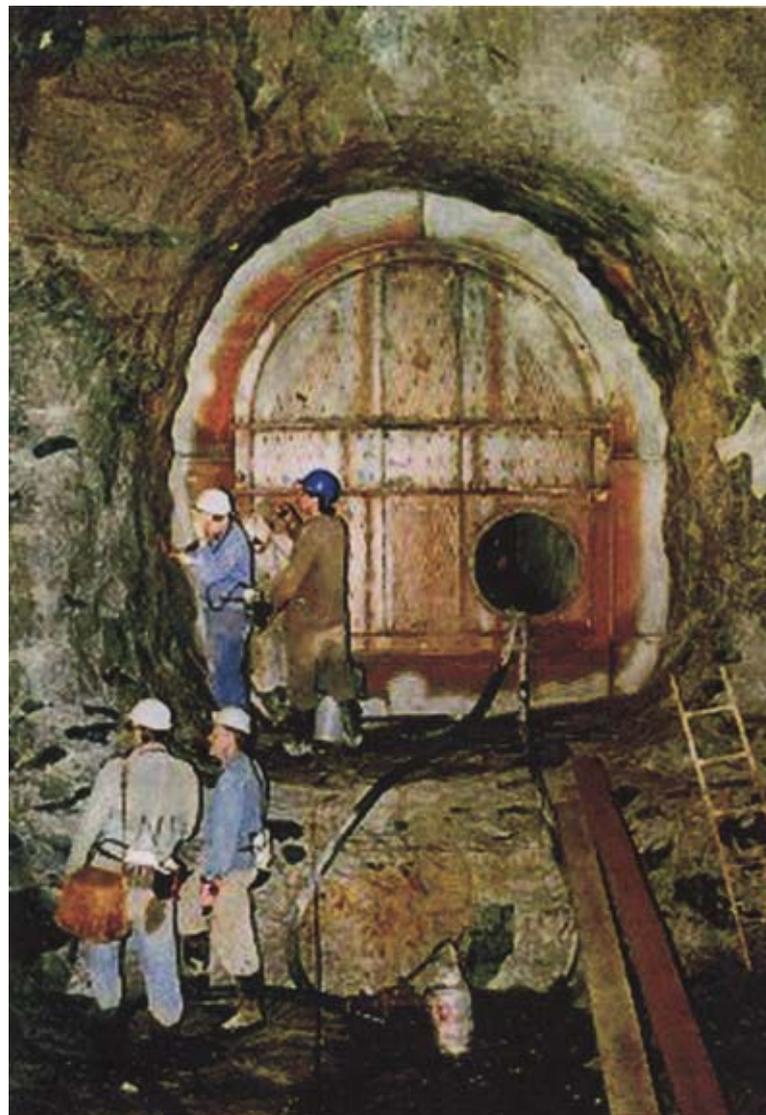


Рис. 2.9. Установка водонепроницаемой перегородки



Рис. 2.10. Строительство полости

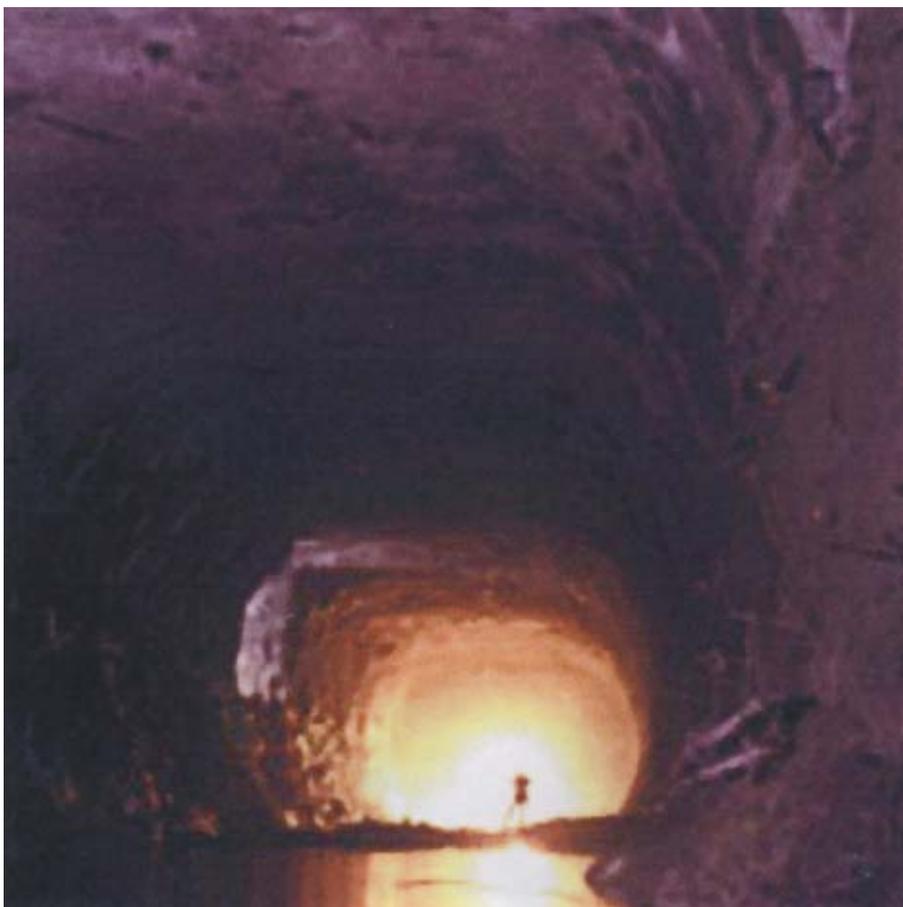


Рис. 2.11. Полость хранения сжиженного газа

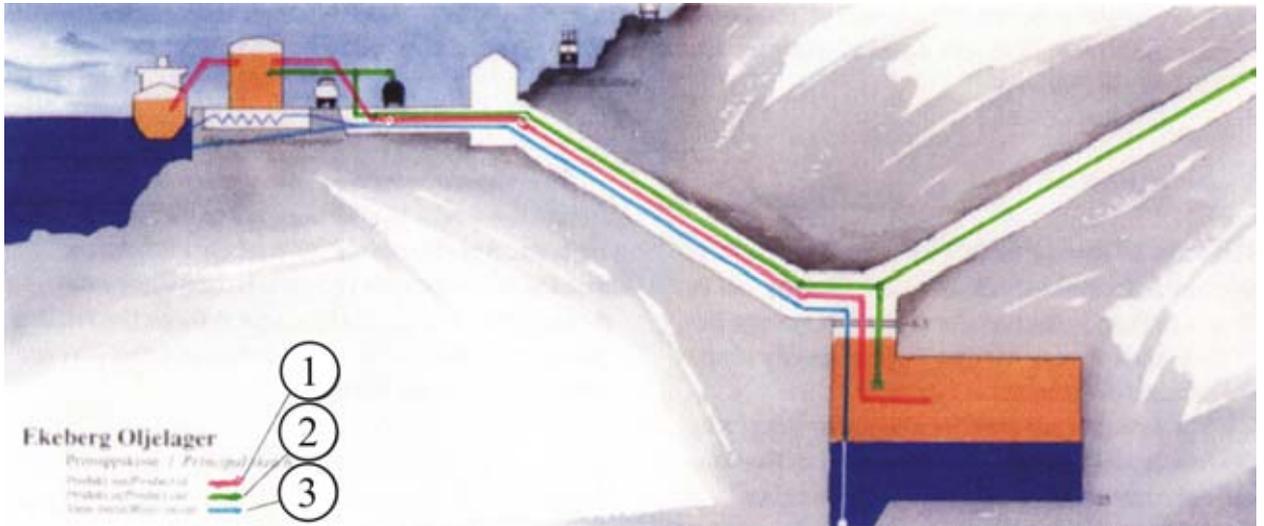


Рис. 2.15. Хранилище с постоянным уровнем топлива

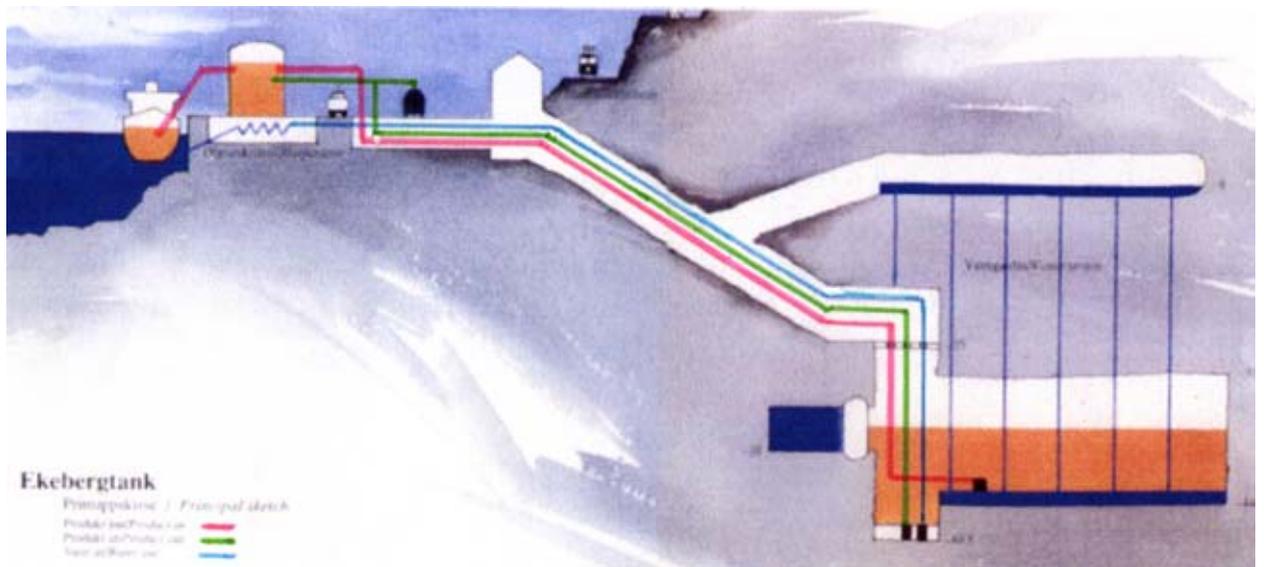


Рис. 2.16. Хранилище с переменным уровнем топлива

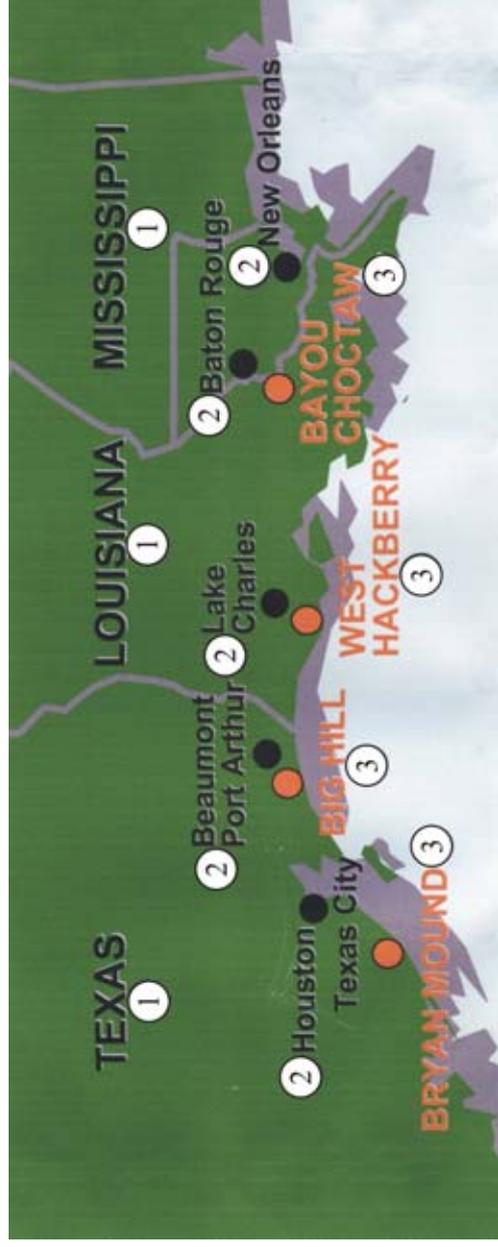


Рис. 2.21. Расположение нефтехранилищ, входящих в стратегический нефтяной резерв США

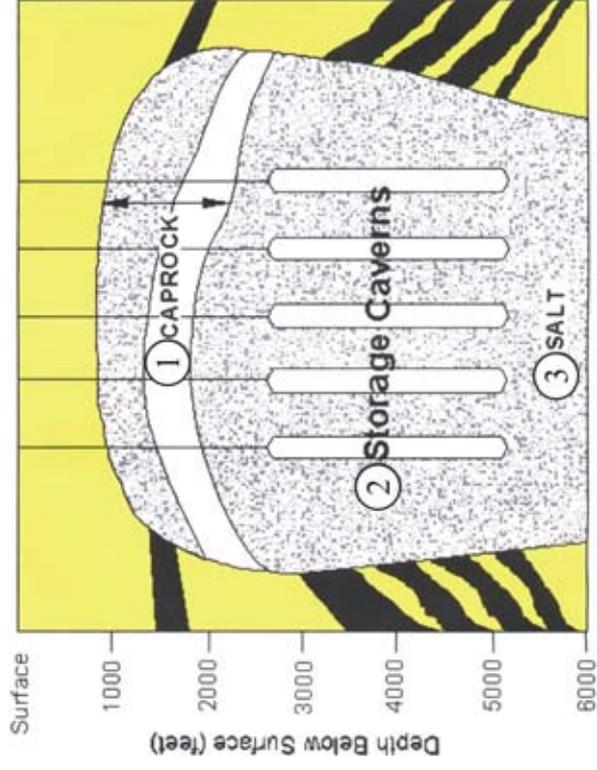


Рис. 2.22. Расположение полостей-нефтехранилищ в соляном месторождении

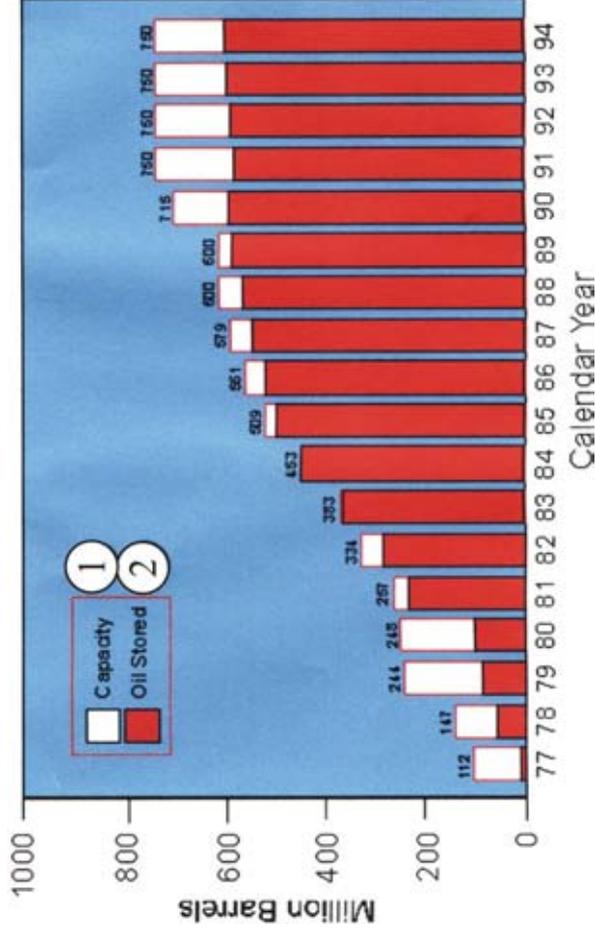


Рис. 2.23. Динамика увеличения емкости стратегического нефтяного резерва США

а)

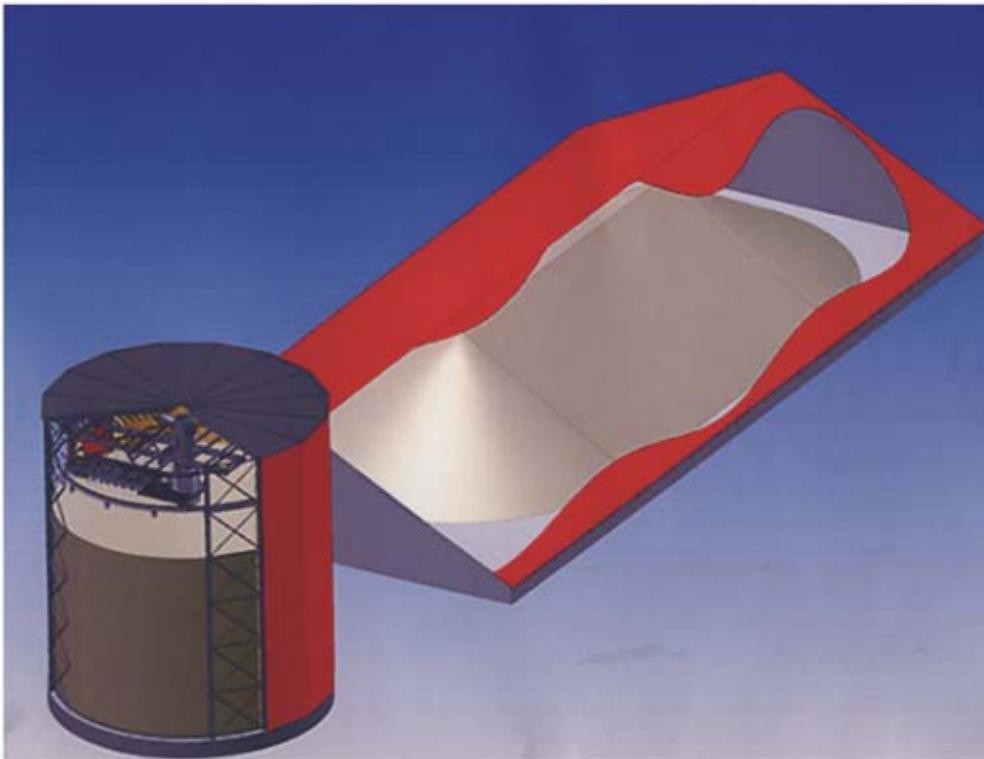


б)



Рис. 2.25. Подземный силосный бункер

а)



б)



Рис. 2.26. Принцип работы подземного силосного бункера



Рис. 2.27. Общий вид тепловой электростанции Салмасаари

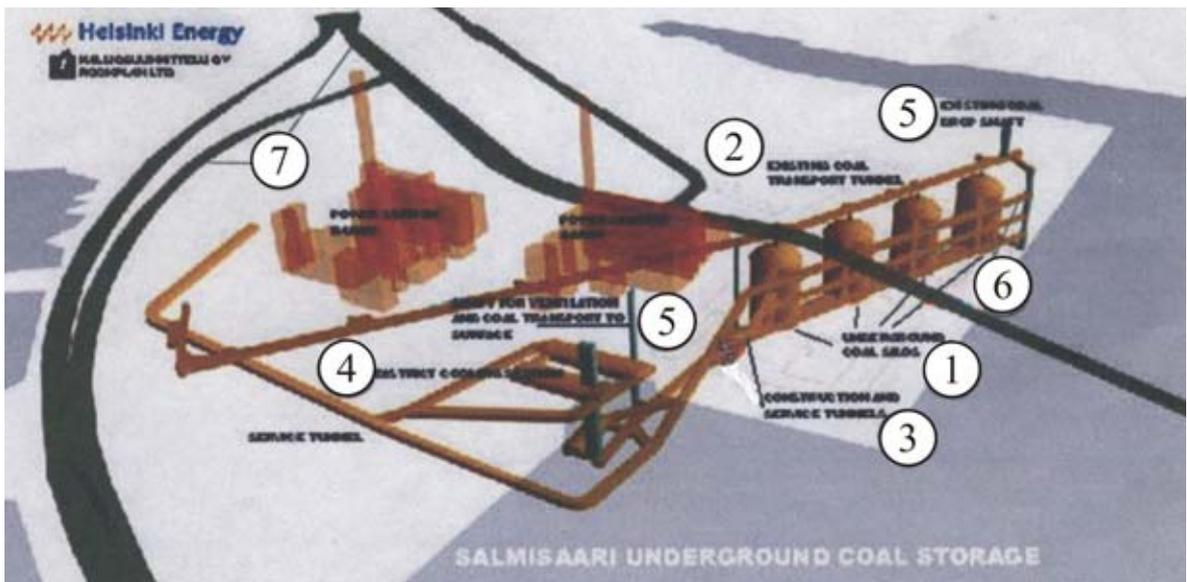


Рис. 2.28. Схема расположения подземных угольных бункеров

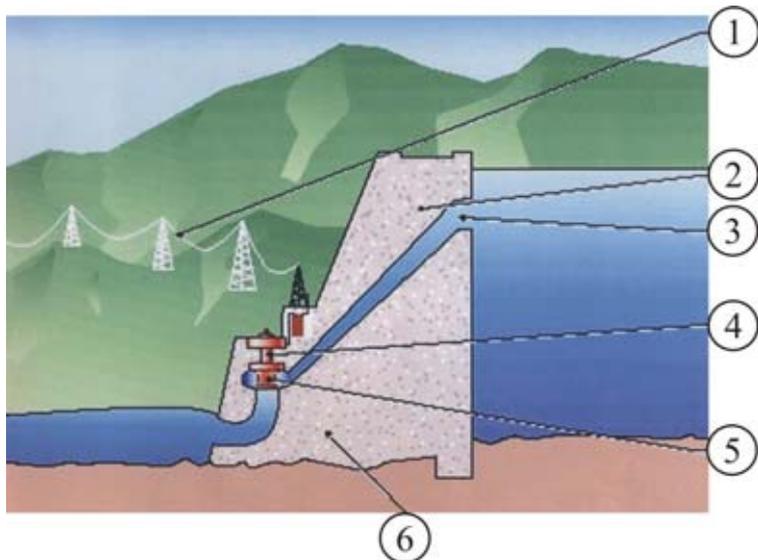


Рис. 2.29. Схема хранения и производства электроэнергии

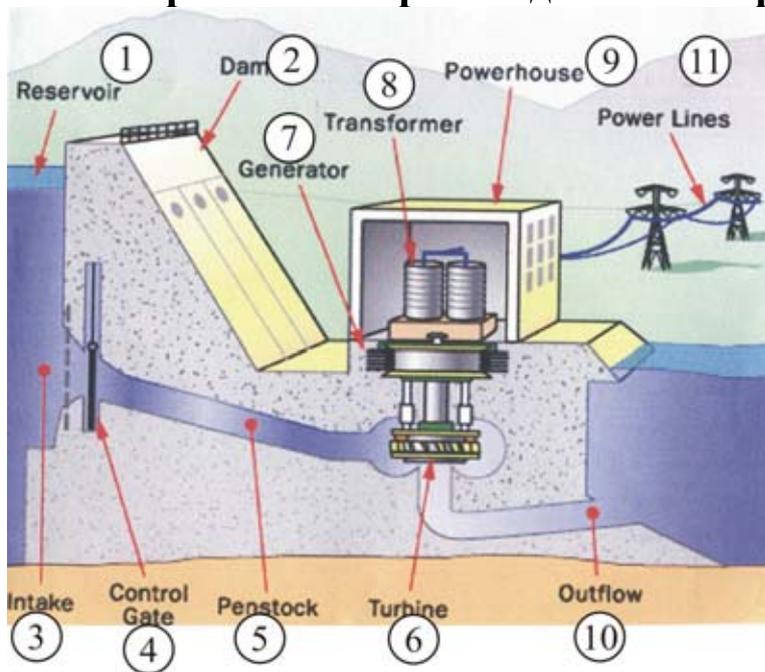


Рис. 2.30. Принципиальная схема работы генератора

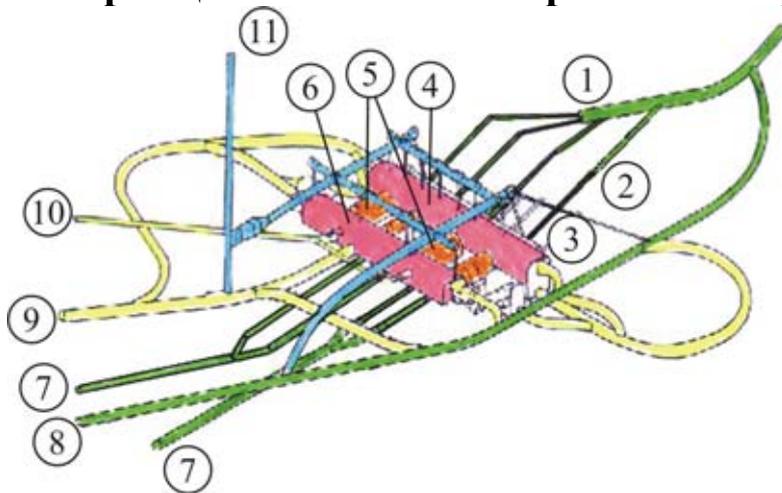


Рис. 2.31. Общая схема подземной структуры гидроаккумулирующей (насосной) электростанции (Динорвиг)

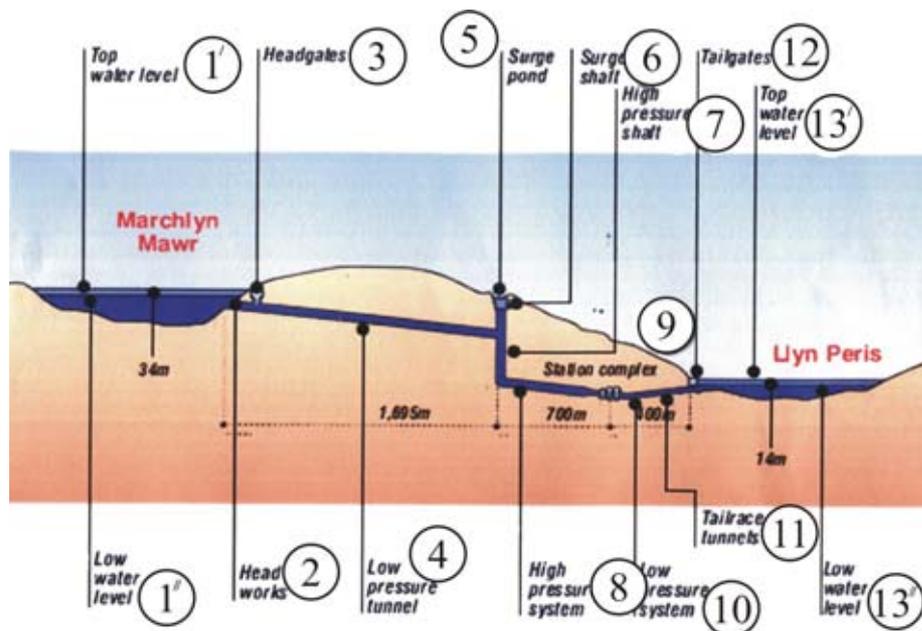


Рис. 2.33. Разрез по подземному комплексу станции Динорвиг

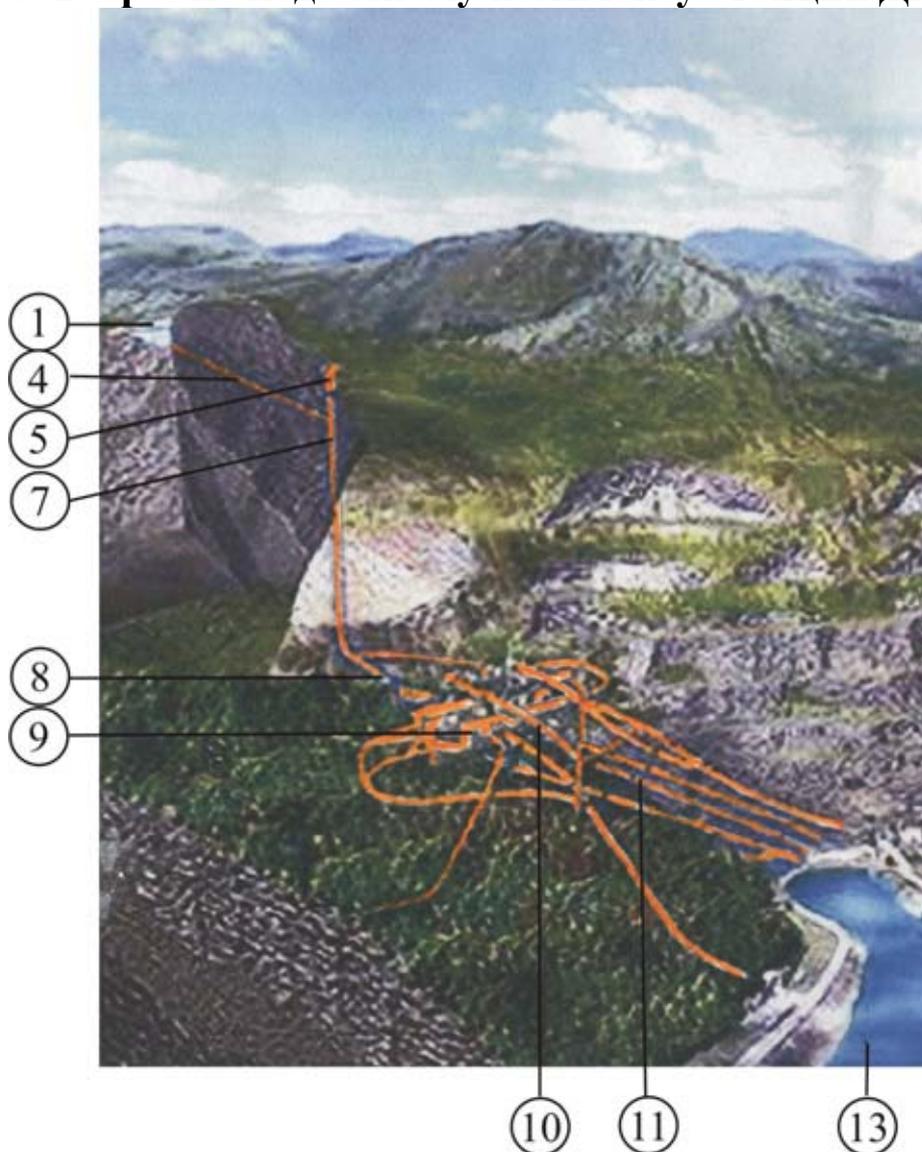


Рис. 2.34. Расположение основных объектов станции Динорвиг в окружающем ландшафте

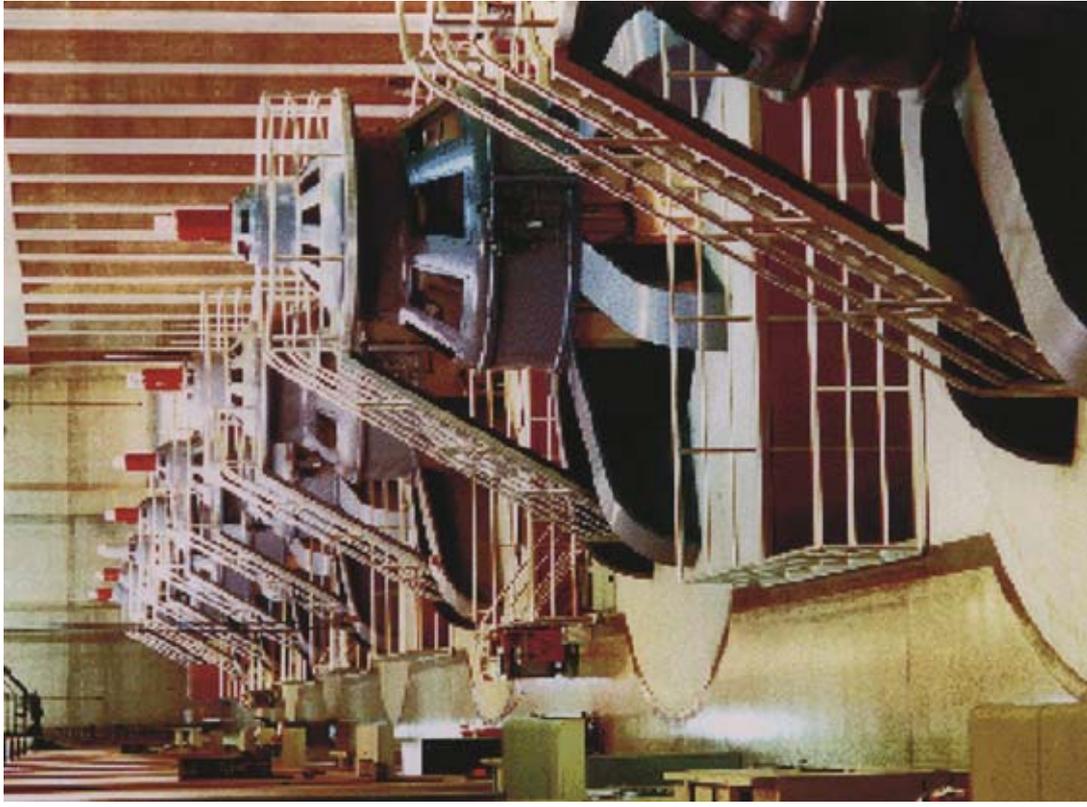
а)



б)



Рис. 2.35. Верхний и нижний резервуар станции Динорвиг



**Рис. 2.36. Генераторный зал станции
Динорви́г**



**Рис. 2.37. Турбинный зал станции
Динорви́г**



Рис. 2.38. Вид с воздуха гидроэлектростанции Круонис



Рис. 2.39. Поверхностный комплекс гидроэлектростанции Окинава с использованием моря в качестве нижнего резервуара

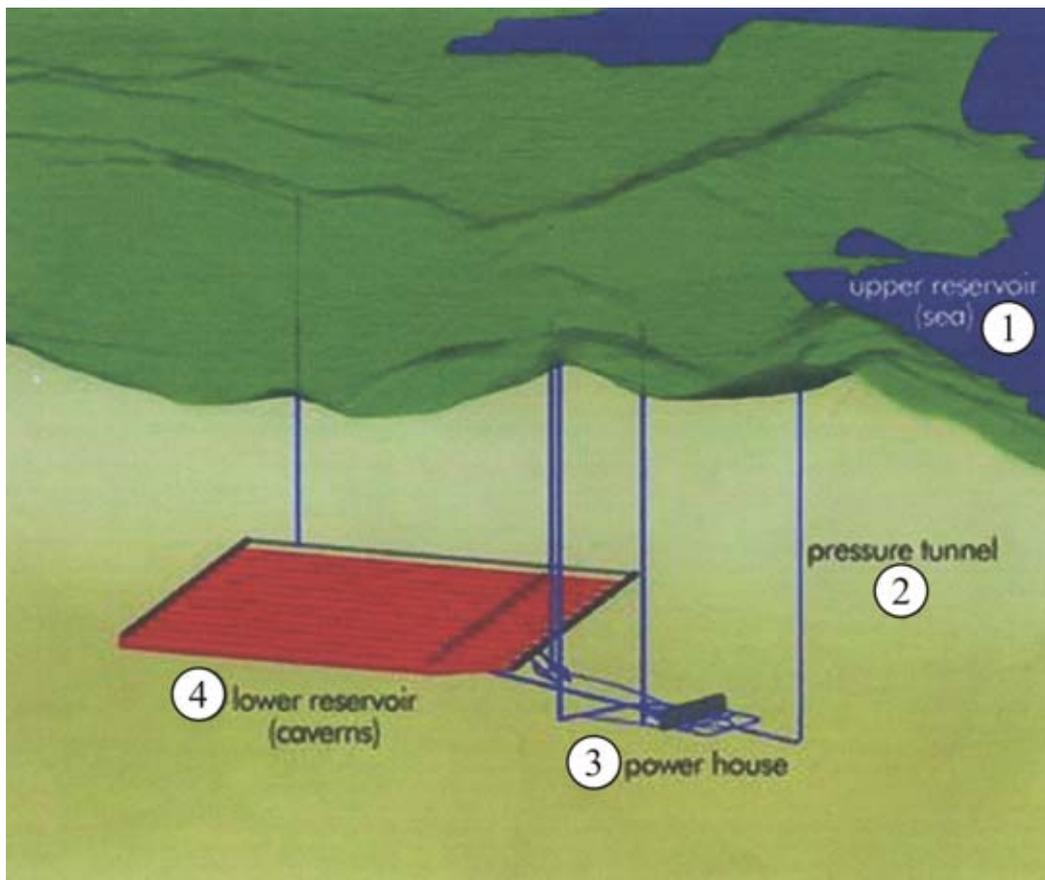


Рис. 2.40. Схема комплекса туннелей и полостей подземной гидроэлектростанции с использованием искусственно сооруженных полостей в качестве нижнего резервуара



Рис. 2.42. Поверхностный комплекс электростанции Барги с подачей воды к турбине по стальным трубам

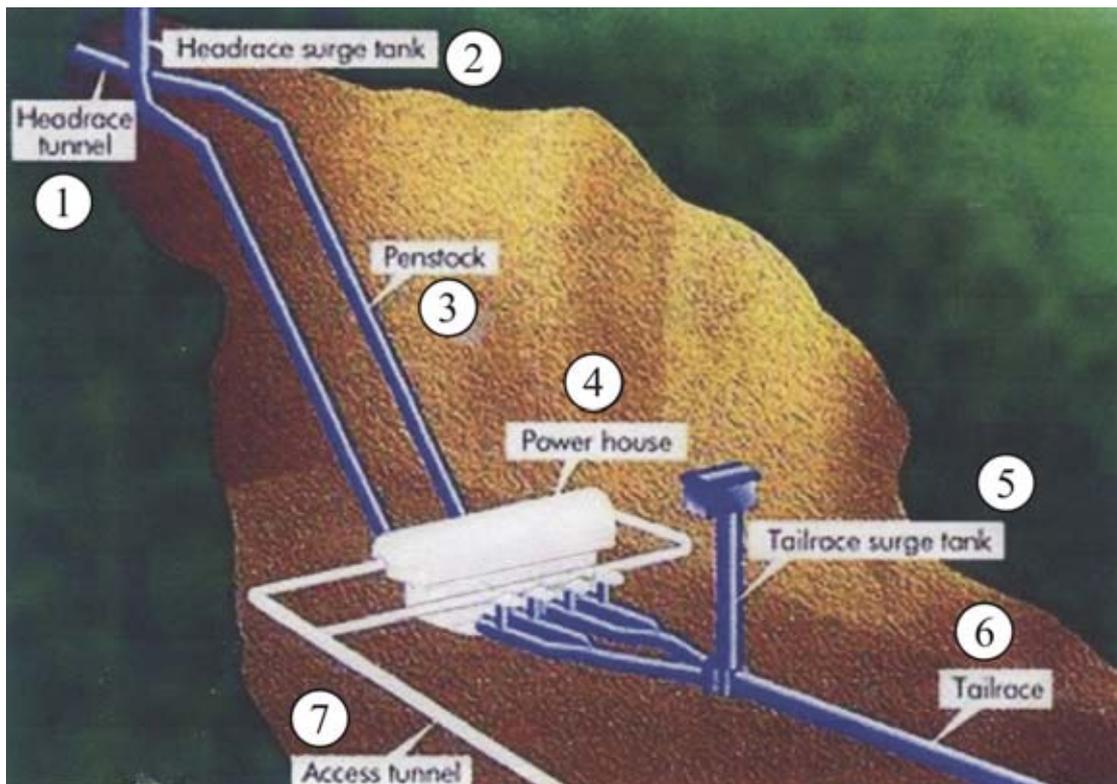


Рис. 2.45. Изометрическая схема комплекса туннелей и полостей подземной гидроэлектростанции

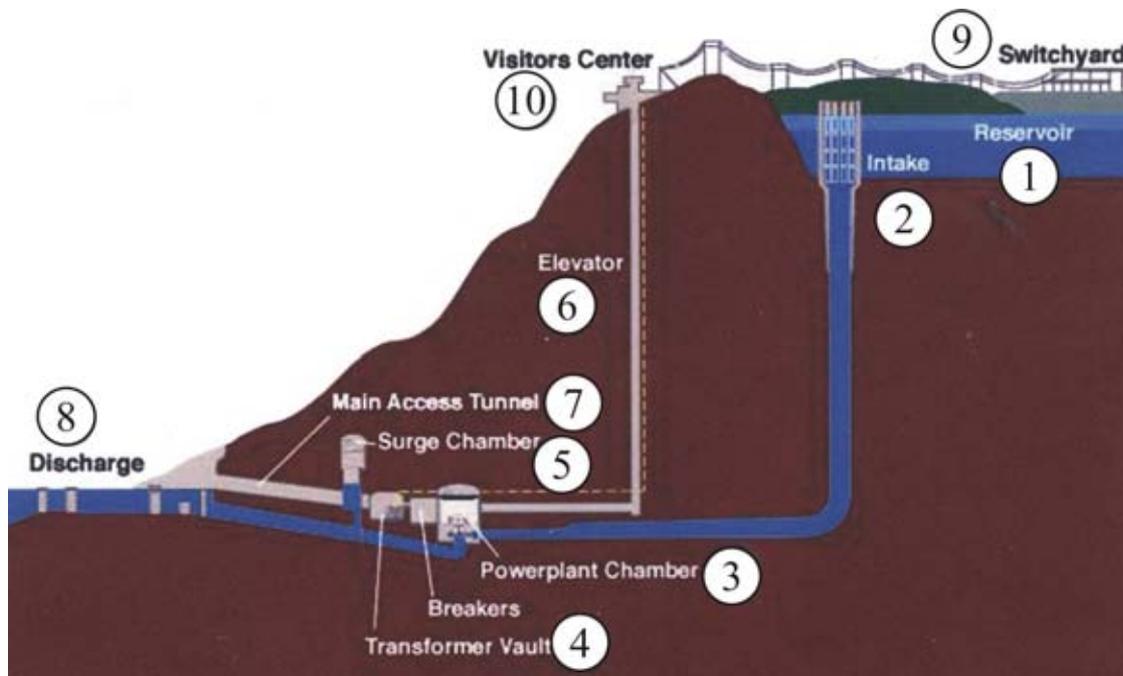


Рис .2.46. Разрез по комплексу подземной гидроэлектростанции



Рис. 2.51. Строительство главного машинного зала подземной электростанции Нью-Скджерка

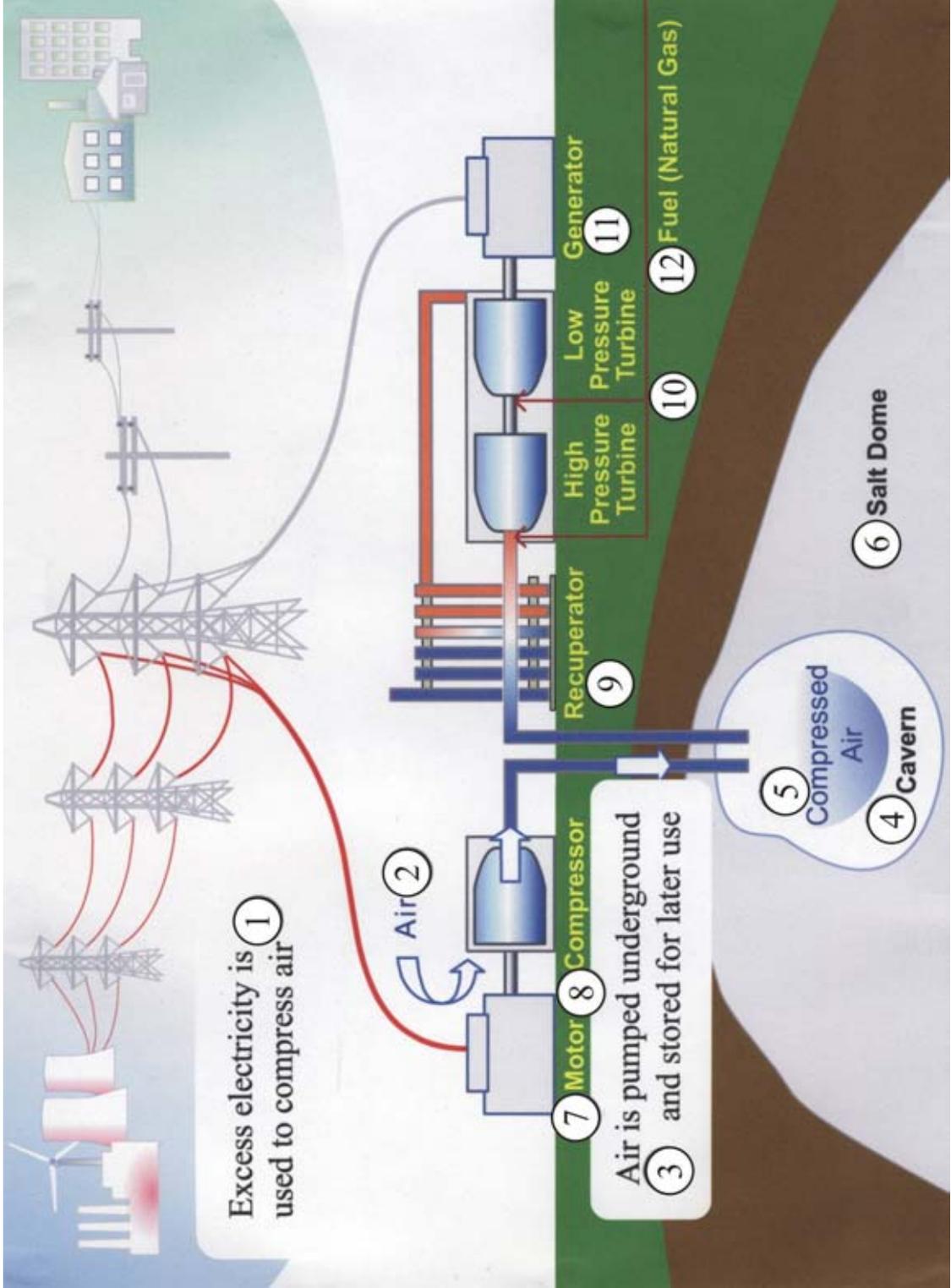


Рис. 2.55. Нагнетание сжатого воздуха в полость

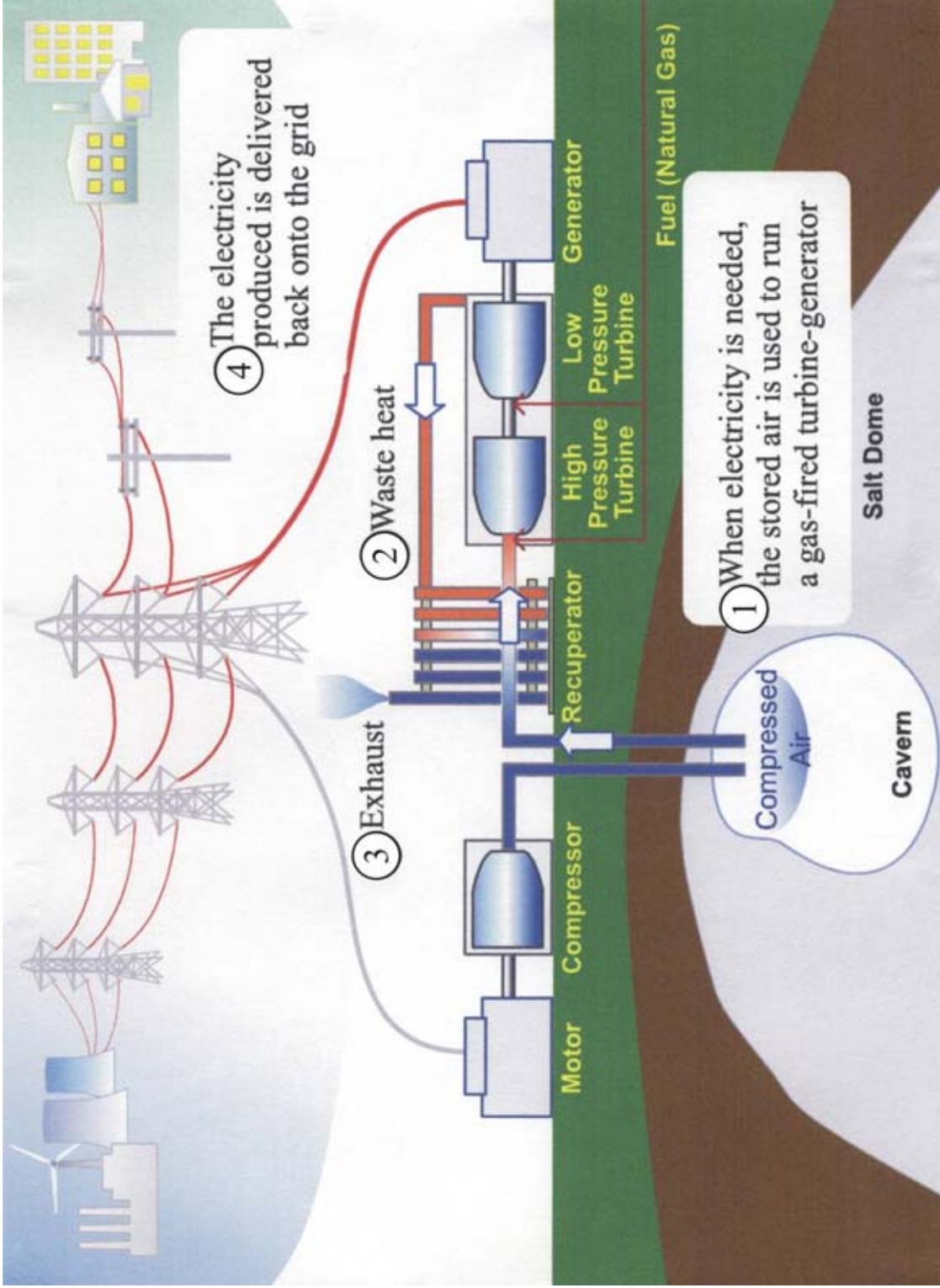


Рис. 2.56. Возврат сжатого воздуха из полости хранения к электростанции

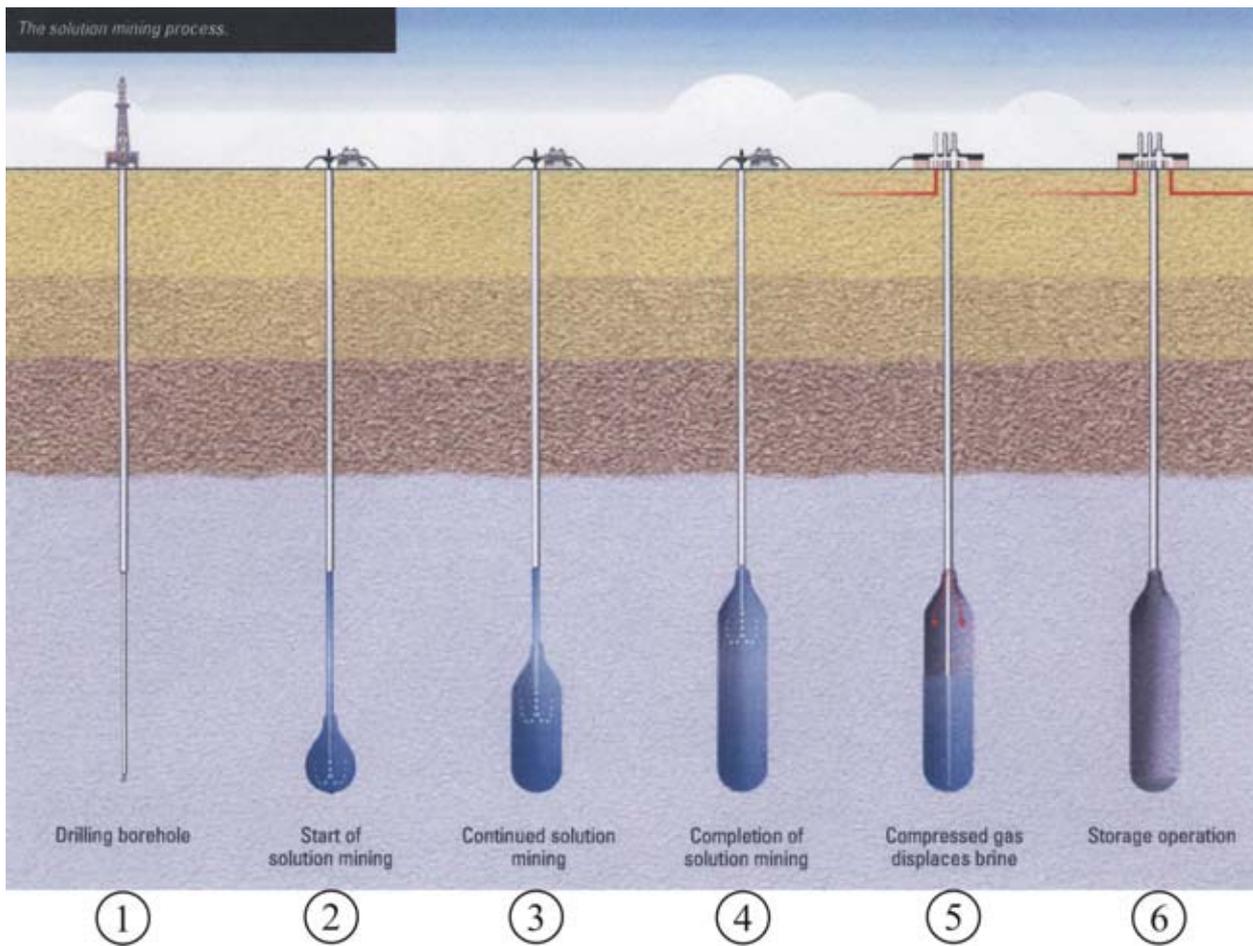


Рис .2.57. Порядок подготовки полости в соляном слое



Рис. 2.58. Вид с воздуха на электростанцию Хантдорф



Рис. 2.61. Подготовка бывшей известняковой шахты к хранению сжатого воздуха

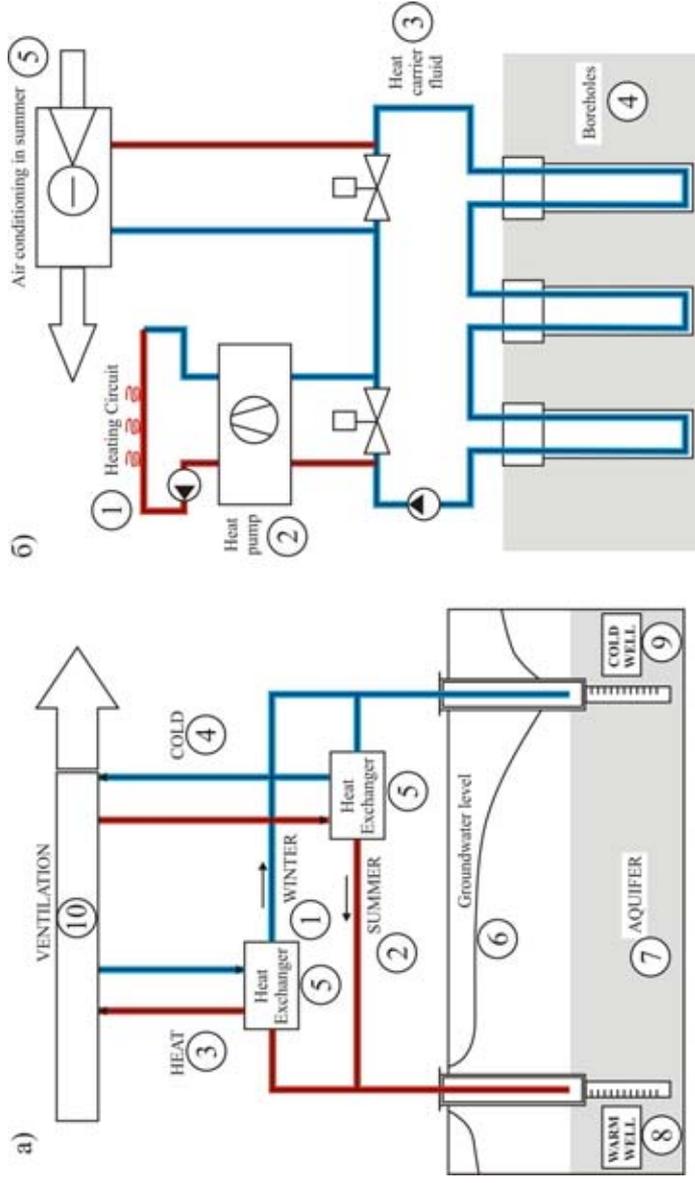


Рис. 2.62. Системы подземного хранения тепла

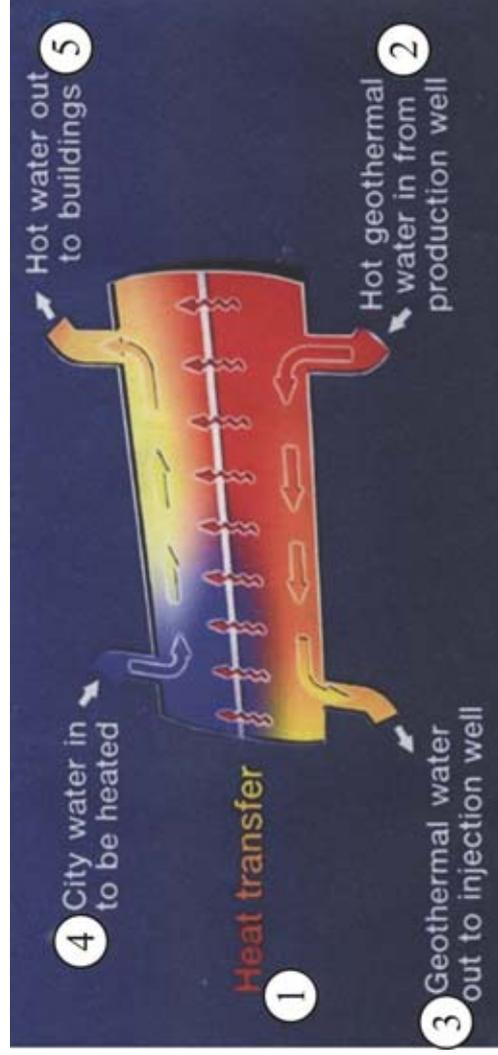


Рис. 2.63. Схема работы теплообменника

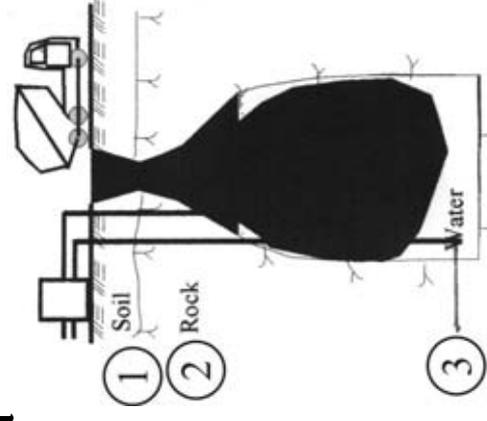


Рис. 2.64. Хранение снега для охлаждения городских районов

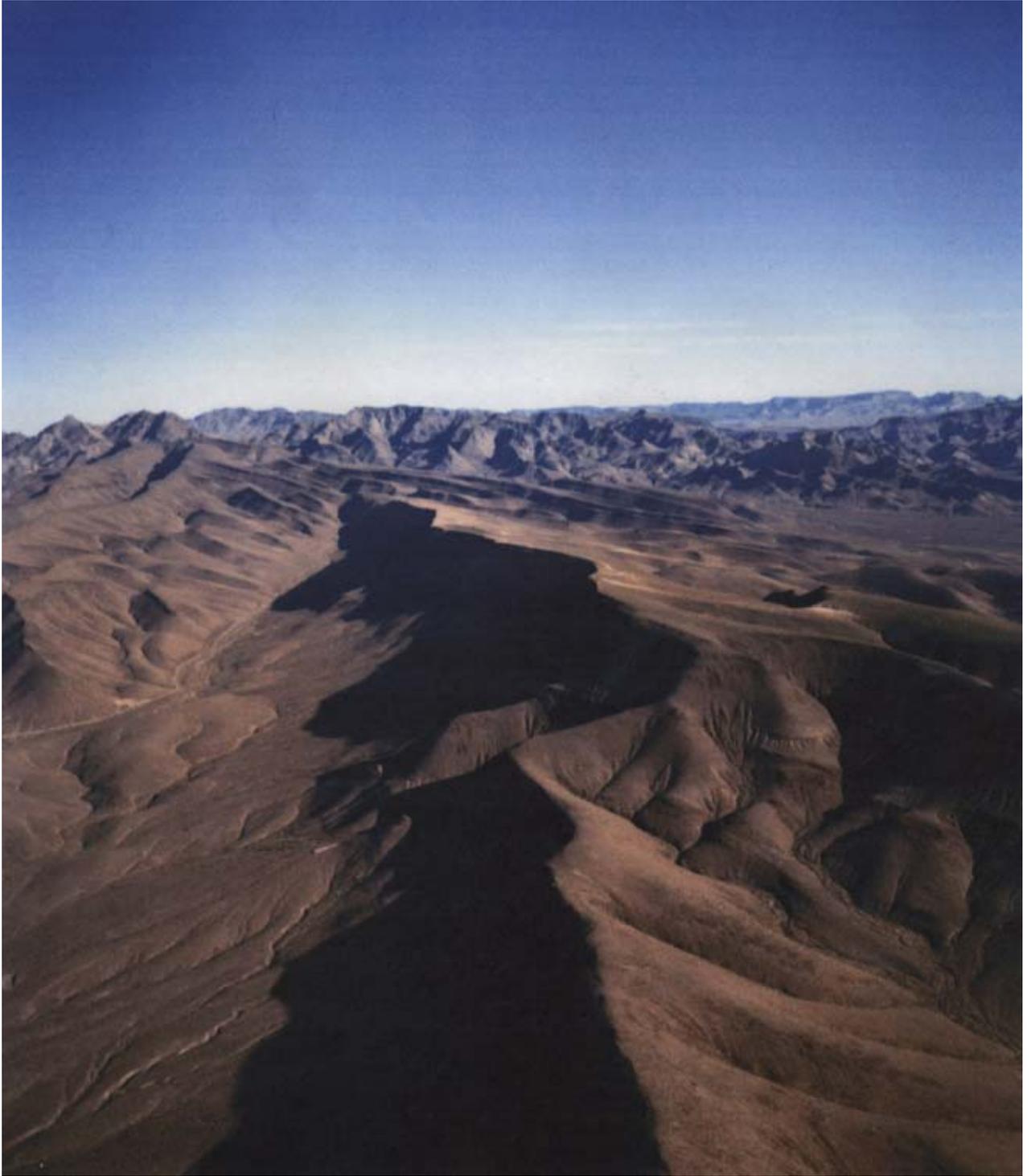


Рис. 3.1. Горный массив Юкка Маунтейн

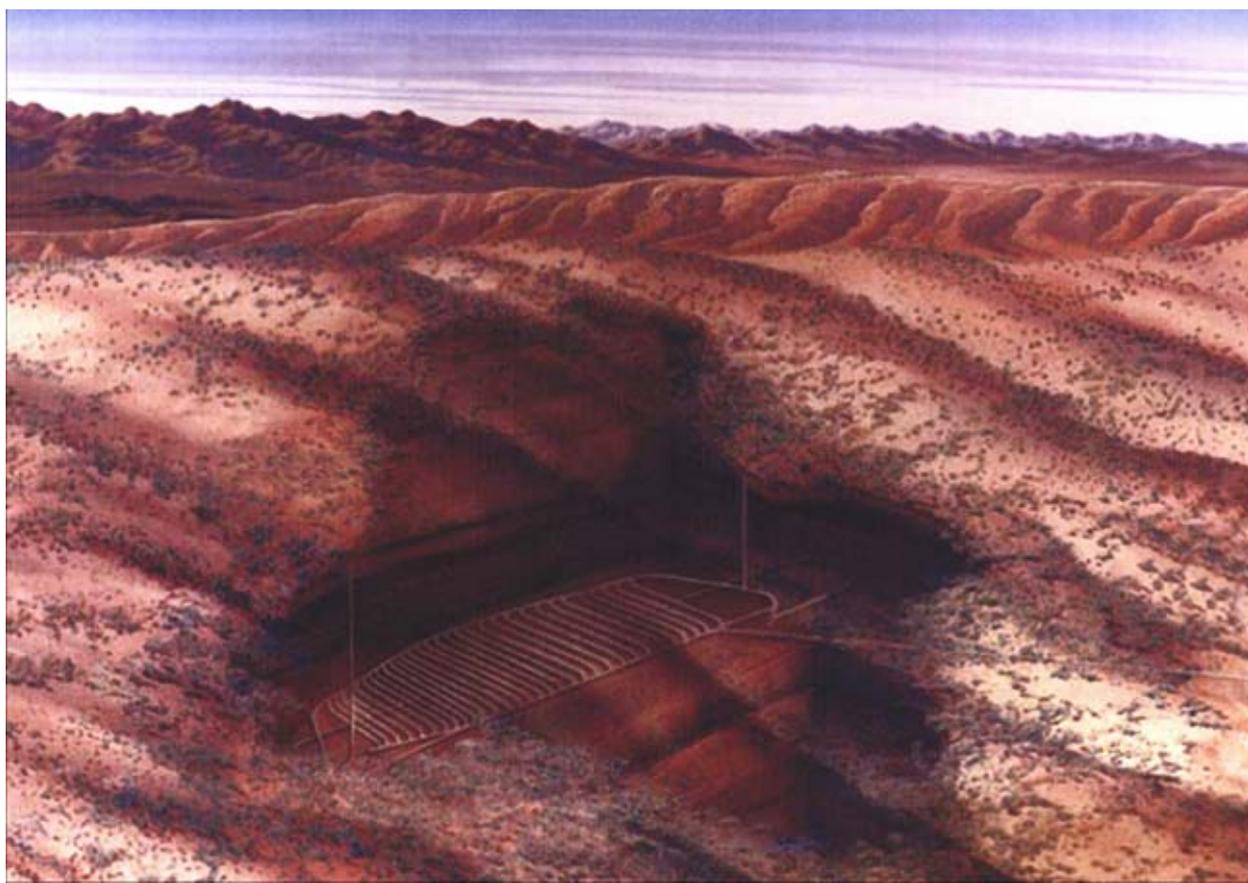


Рис. 3.2. Схема подземного расположения хранилища радиоактивных отходов

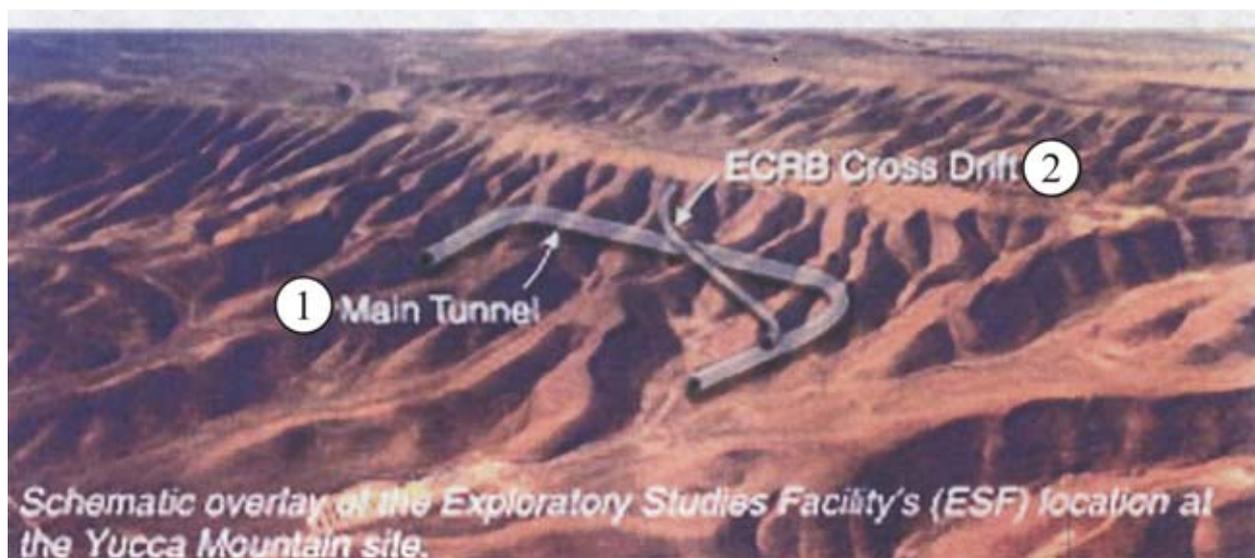


Рис. 3.3. Схема расположения главного туннеля (туннельной петли) в горном массиве



Рис. 3.4. Расположение комплекса Юкка Маунтейн на территории США и штата Невада

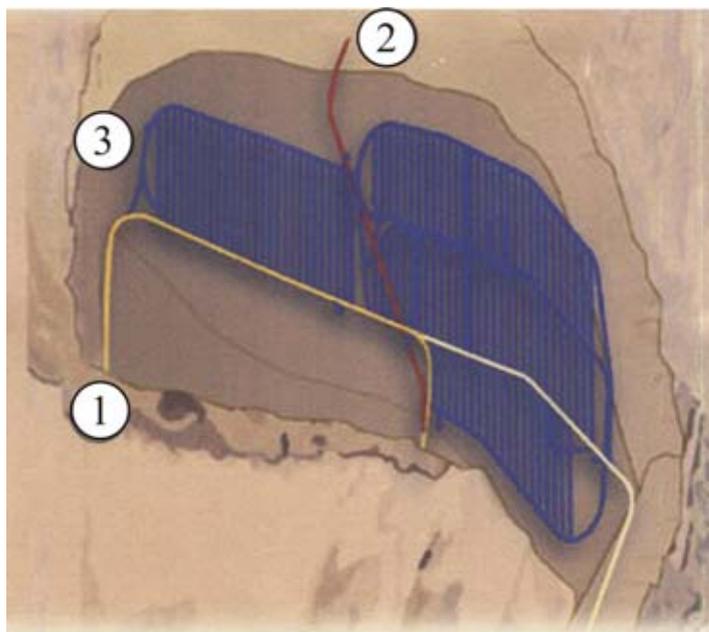


Рис. 3.5. Совмещенная схема горного массива и подземного хранилища



Рис. 3.6. Вид со спутника на площадку комплекса Юкка Маунтейн

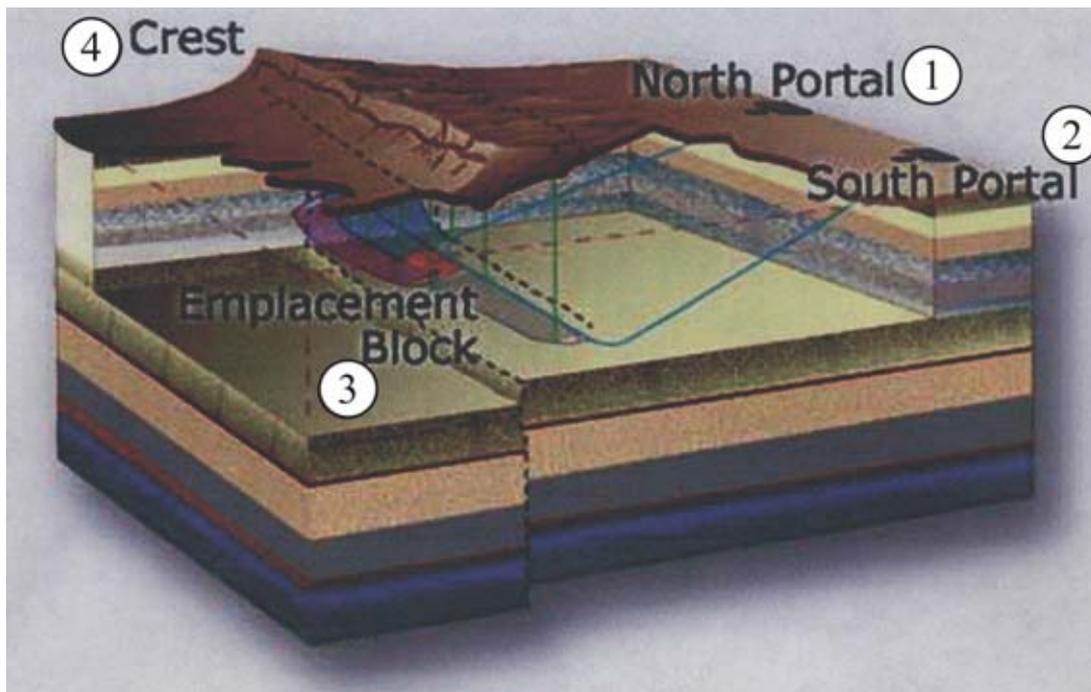


Рис. 3.7. Совмещенная схема геологических формаций и главного туннеля

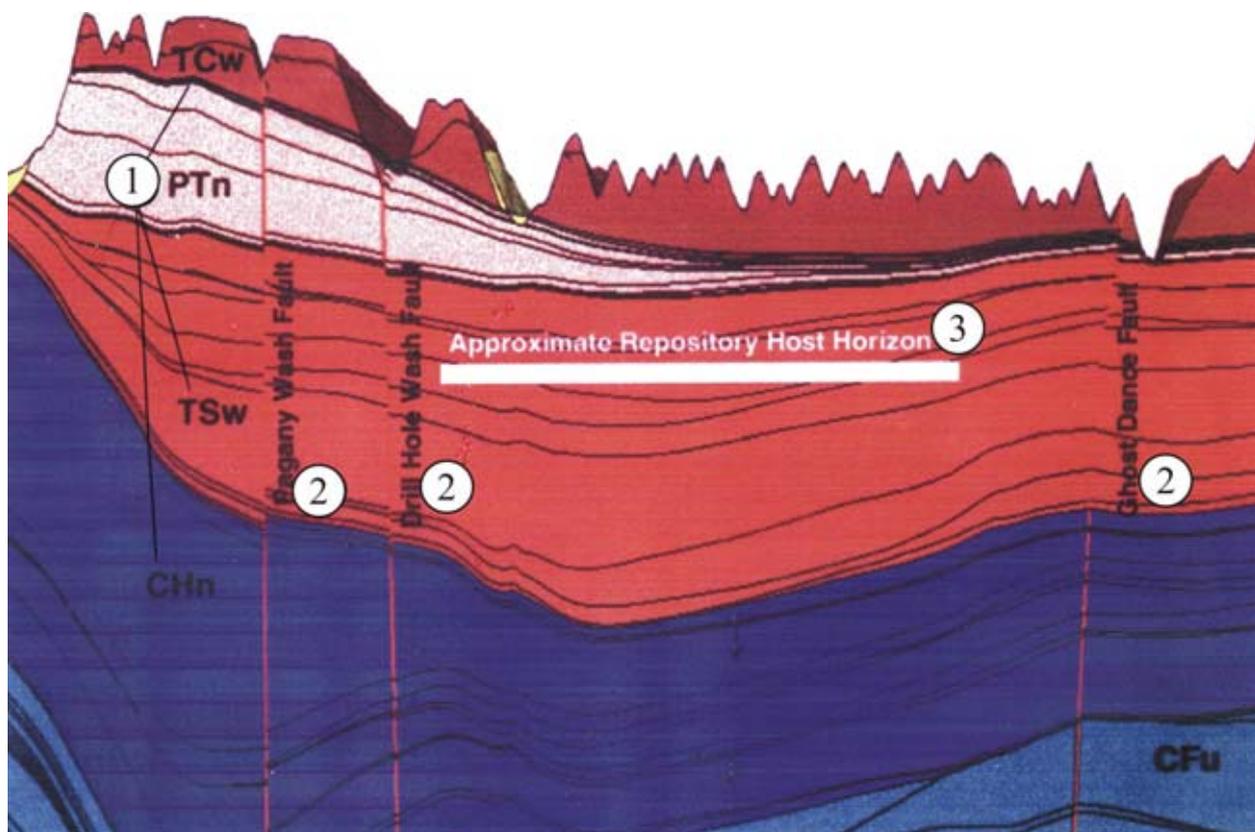


Рис. 3.8. Геологический разрез в районе строительства хранилища Юкка Маунтейн

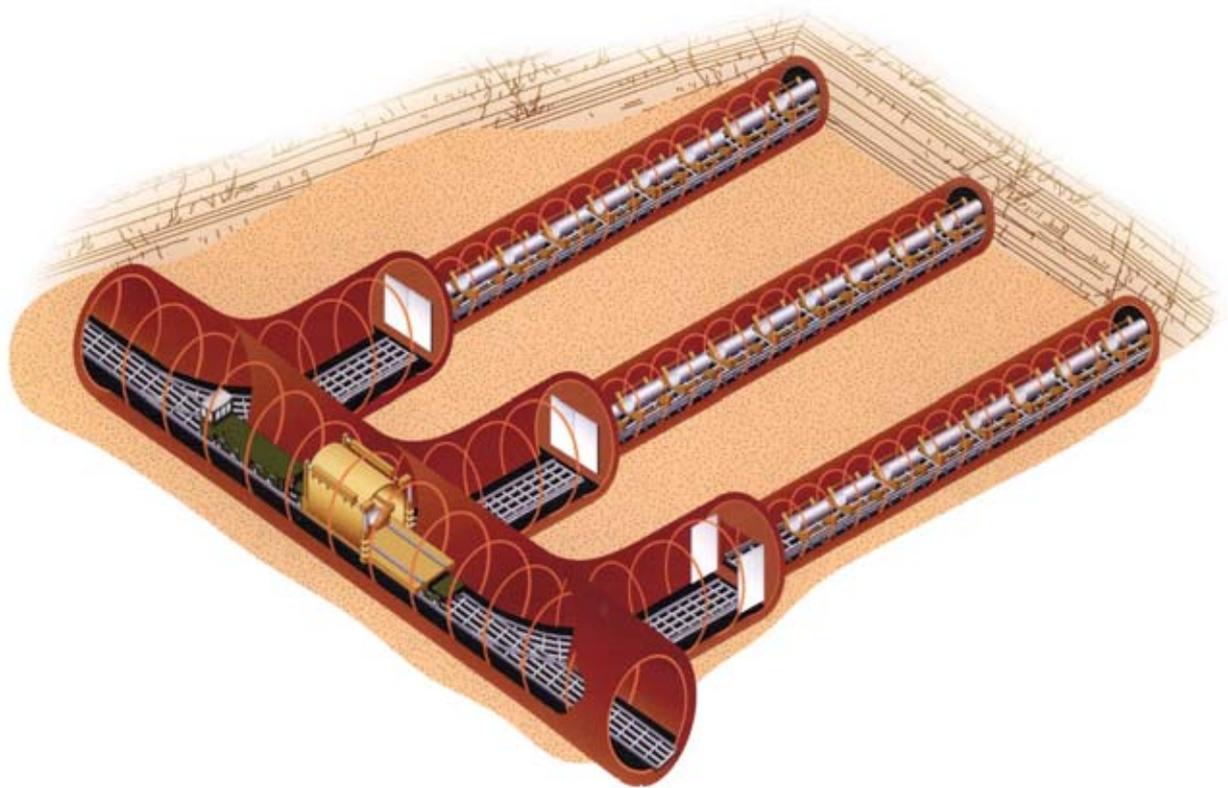


Рис. 3.17. Конструкция транспортных туннелей и туннелей хранения

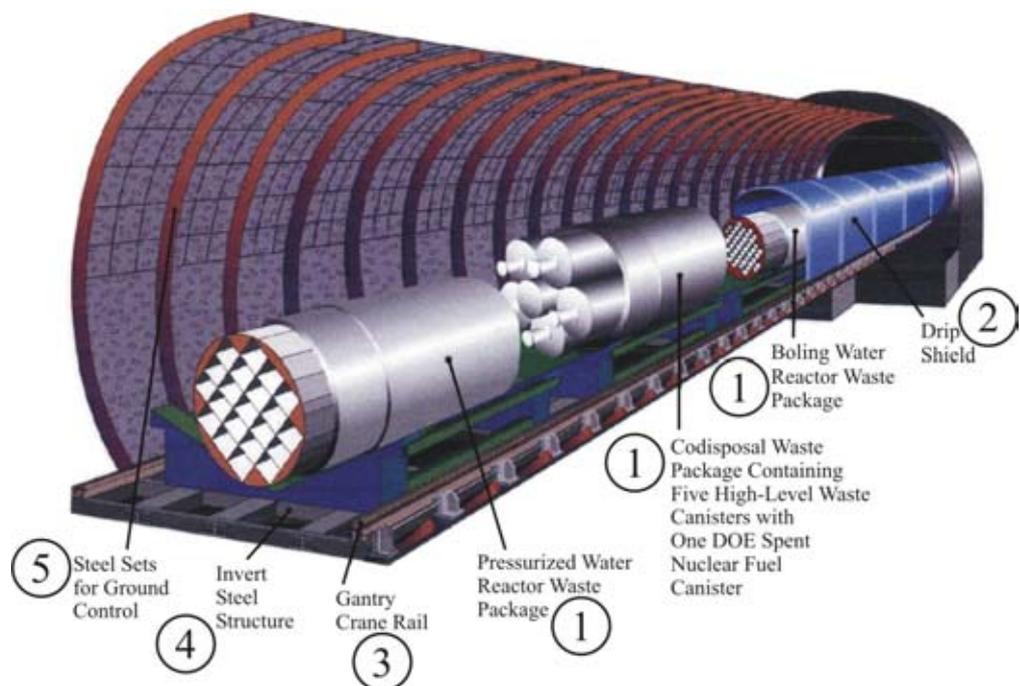


Рис. 3.20. Расположение контейнеров с отходами в туннеле хранения



Рис. 3.21. Комплекс поверхностных зданий в сооружении ВИШ



Рис. 3.22. Карта расположения хранилища ВИШ

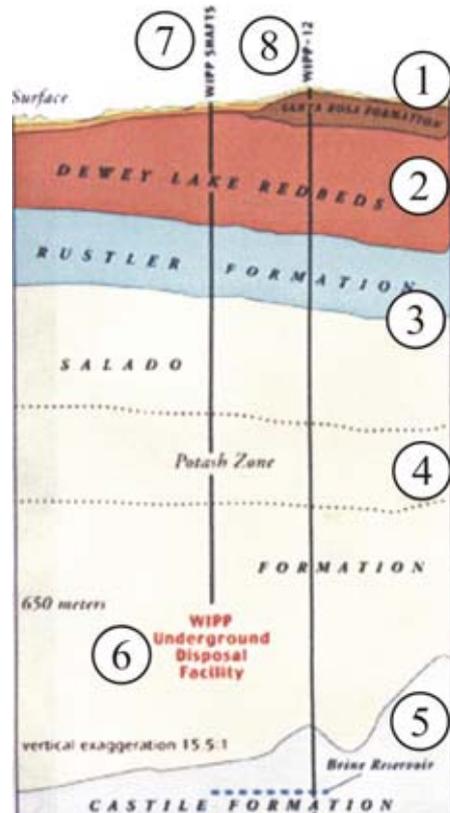


Рис. 3.23. Геологическое строение района расположения ВИШ

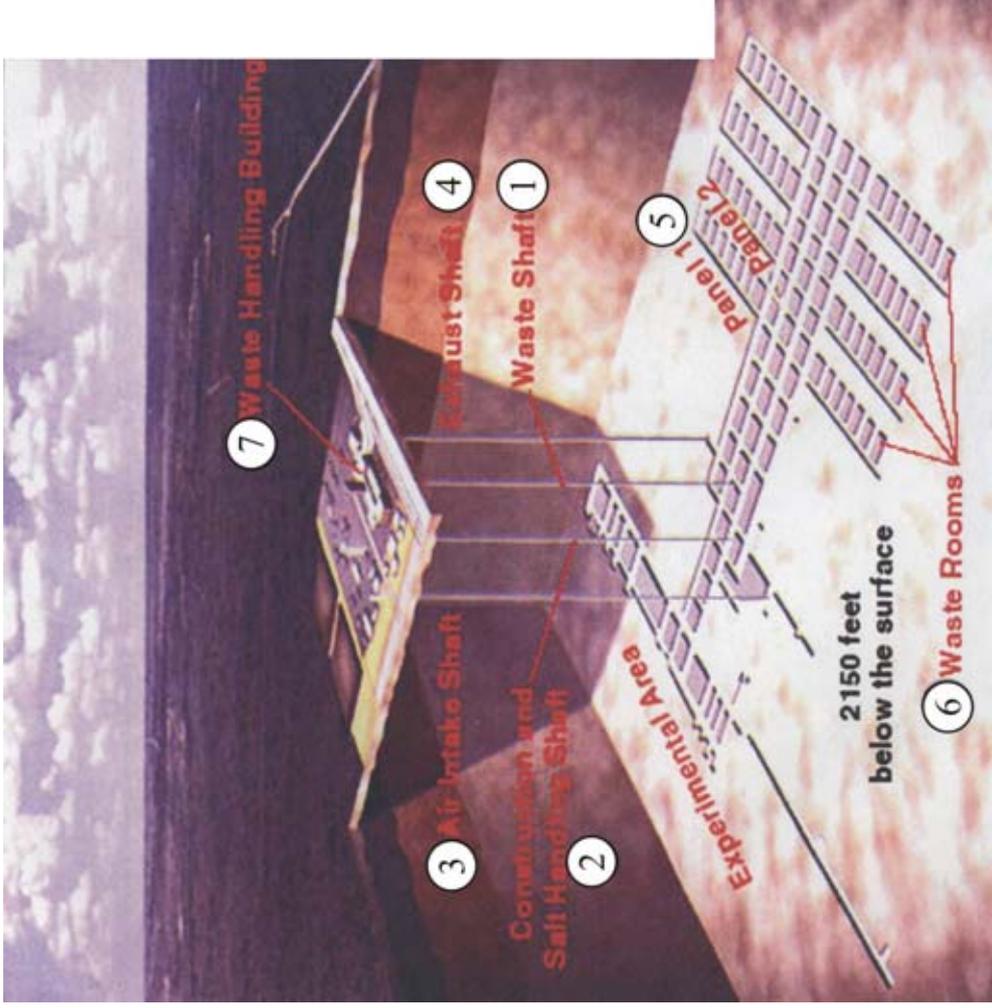


Рис. 3.24. Совмещенная схема поверхности и подземного комплекса хранилища

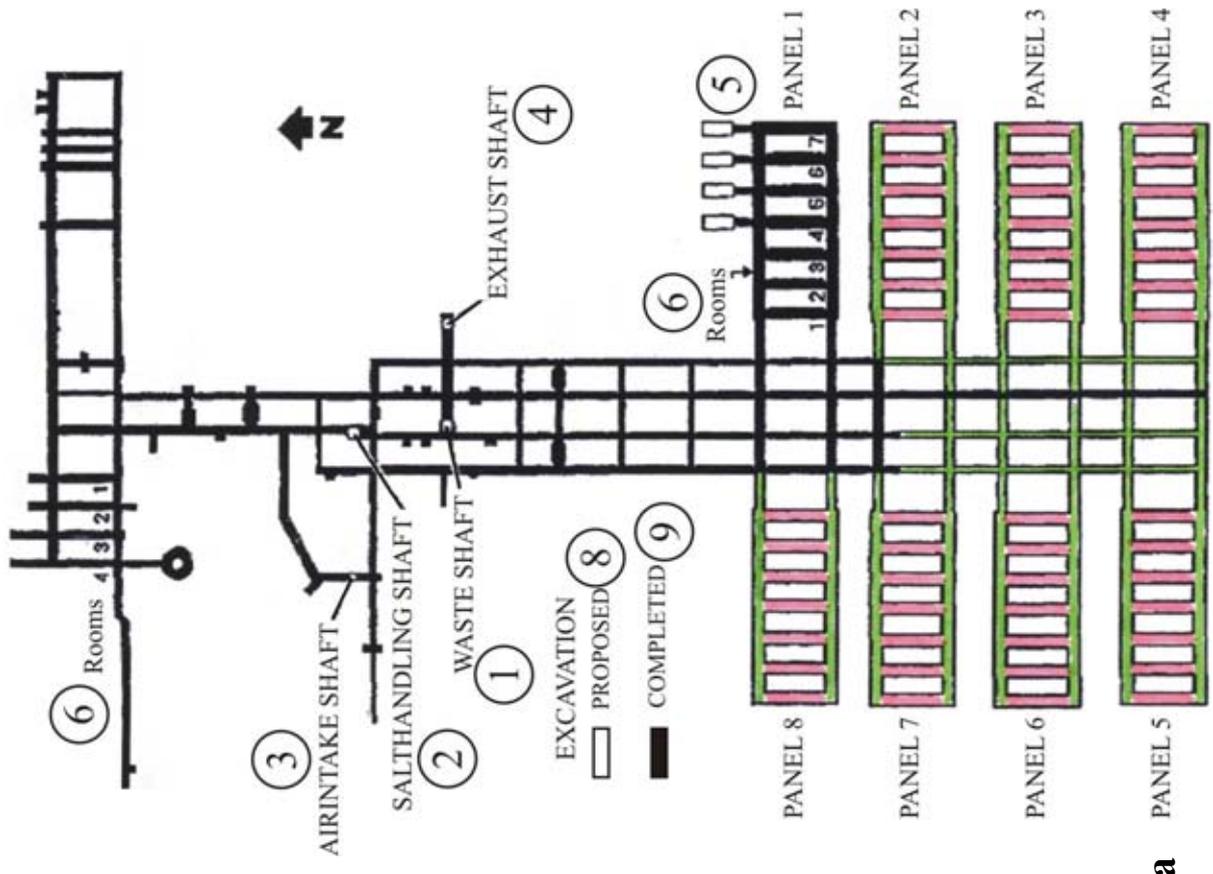


Рис. 3.25. Схема подземного комплекса хранилища

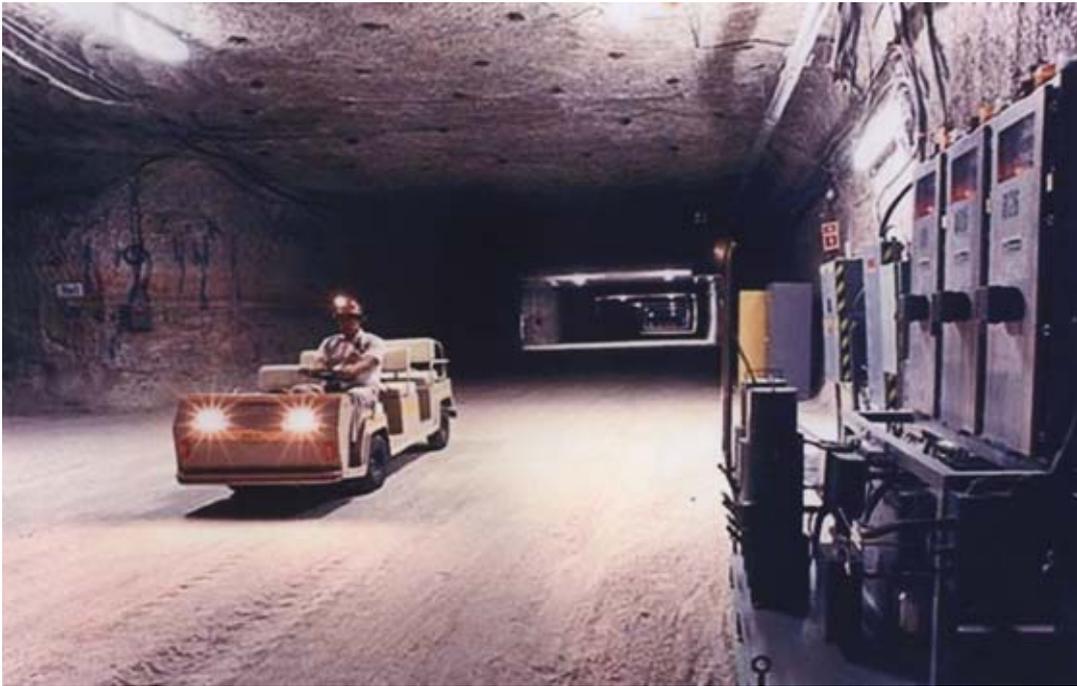


Рис. 3.26. Туннель панелей хранения отходов



Рис. 3.27. Контейнеры с отходами в помещении хранения

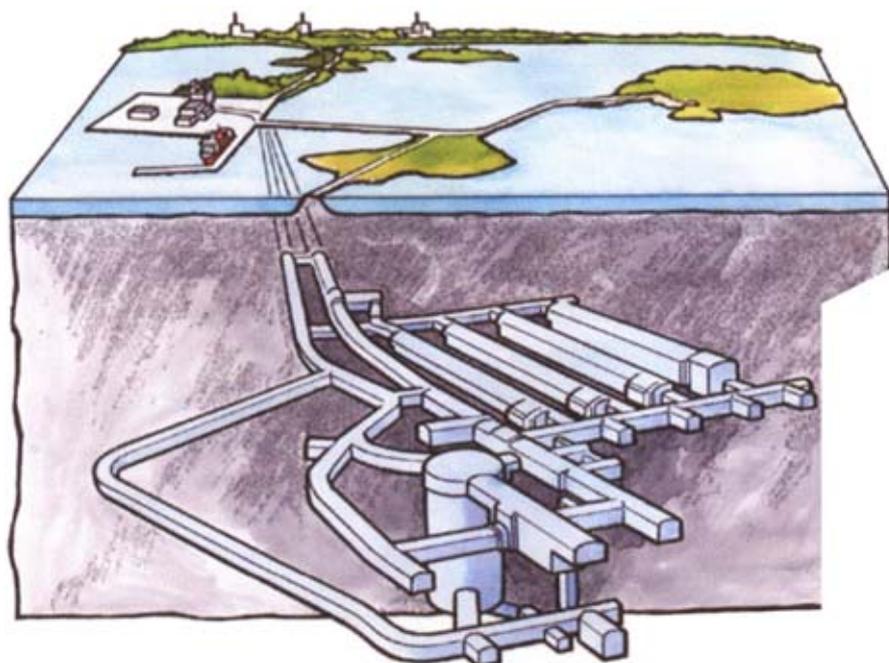


Рис. 3.28. Комплекс подземного хранения SFR (Швеция)

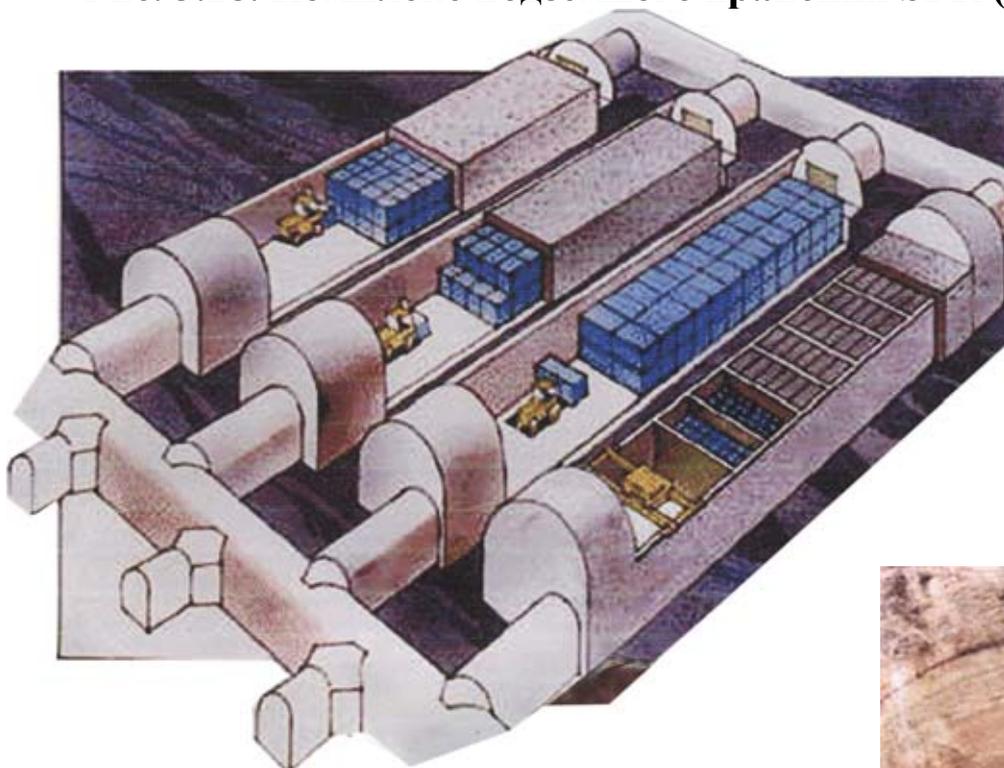


Рис. 3.29. Горизонтальные хранилища комплекса SFR

Рис. 3.30. Вертикальная скважина для хранения канистр с отходами



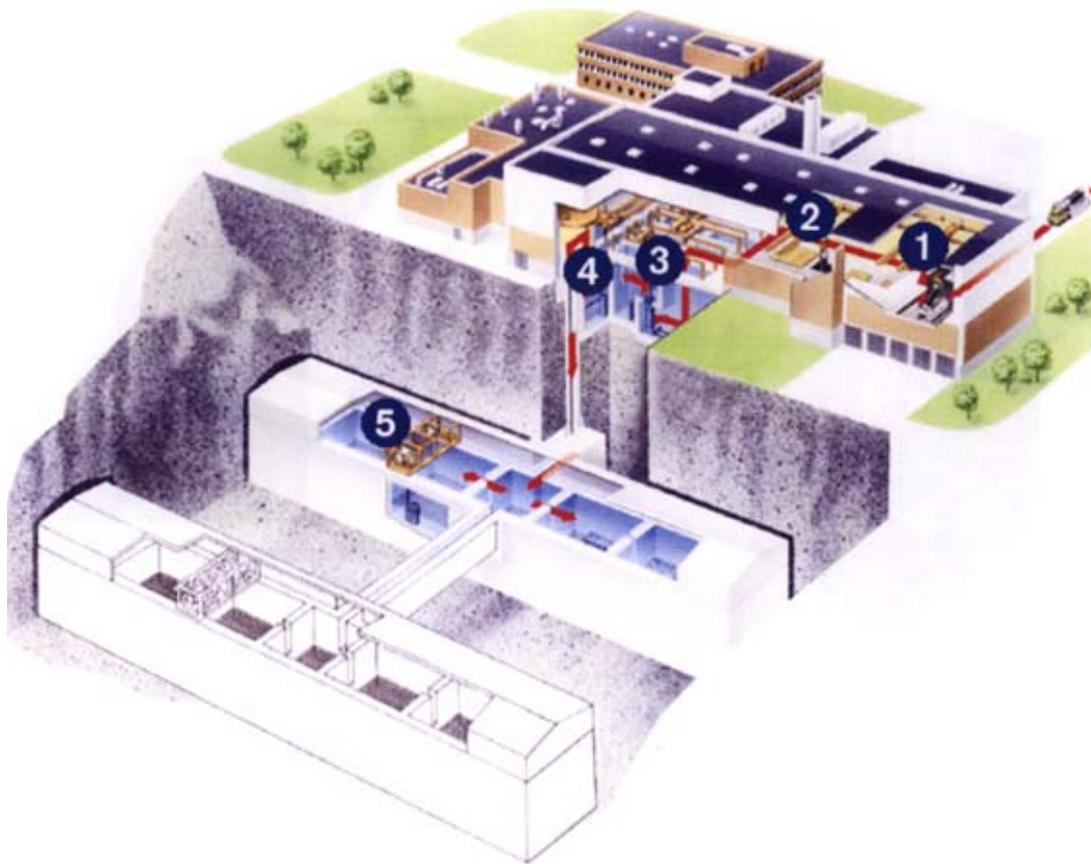


Рис. 3.32. Комплекс подземного хранилища СЛАВ (Швеция)

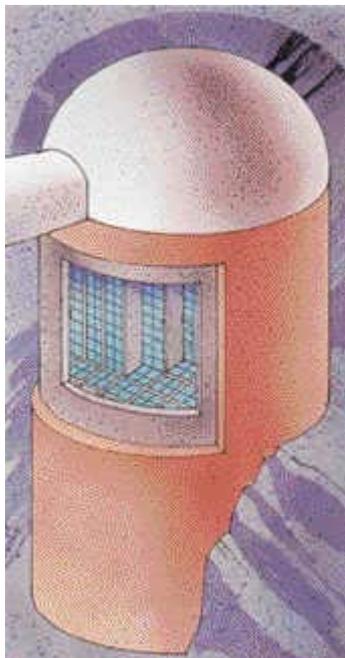


Рис. 3.31. Вертикальная скважина для хранения канистр с отходами

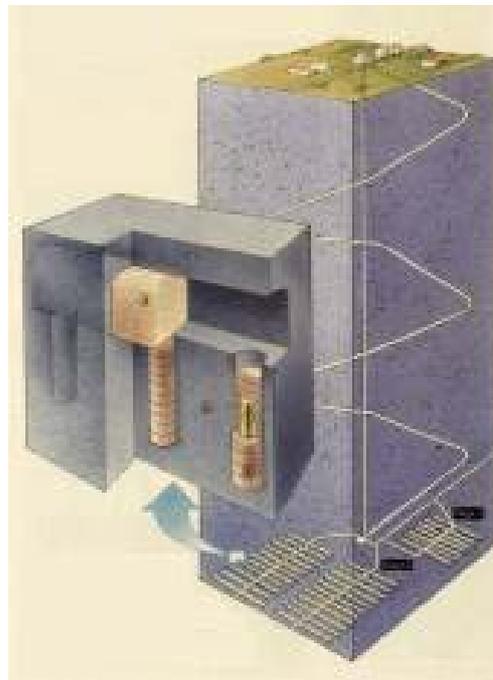
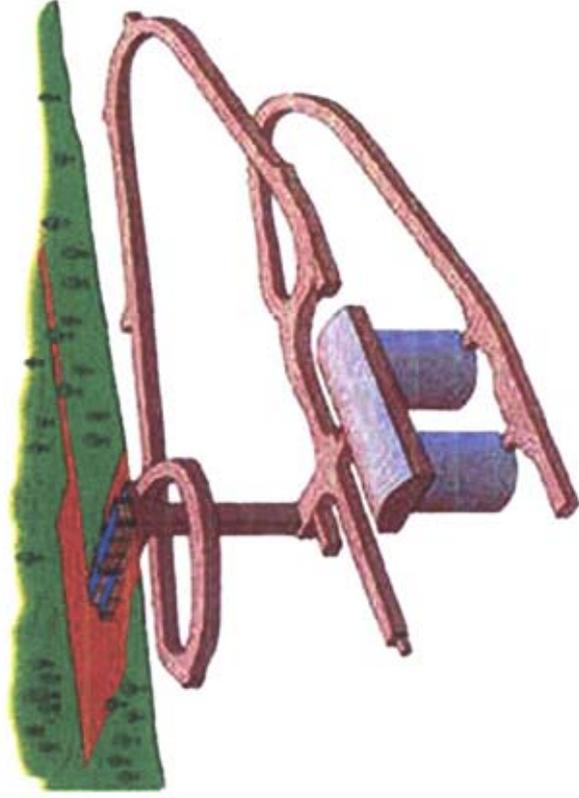


Рис. 3.33. Постоянное хранилище отходов с высоким уровнем радиоактивности

а)



б)

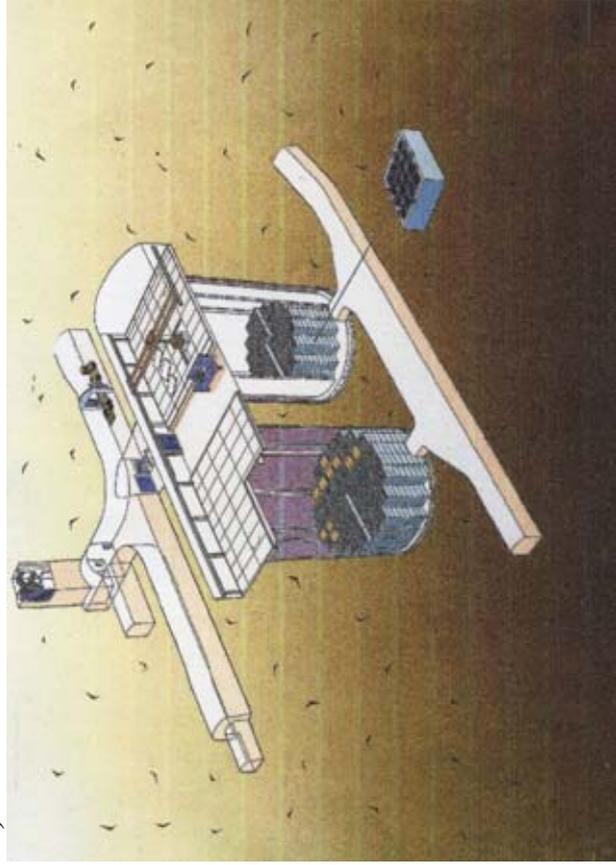


Рис. 3.35. Подземное хранилище Олкилуото (Финляндия)

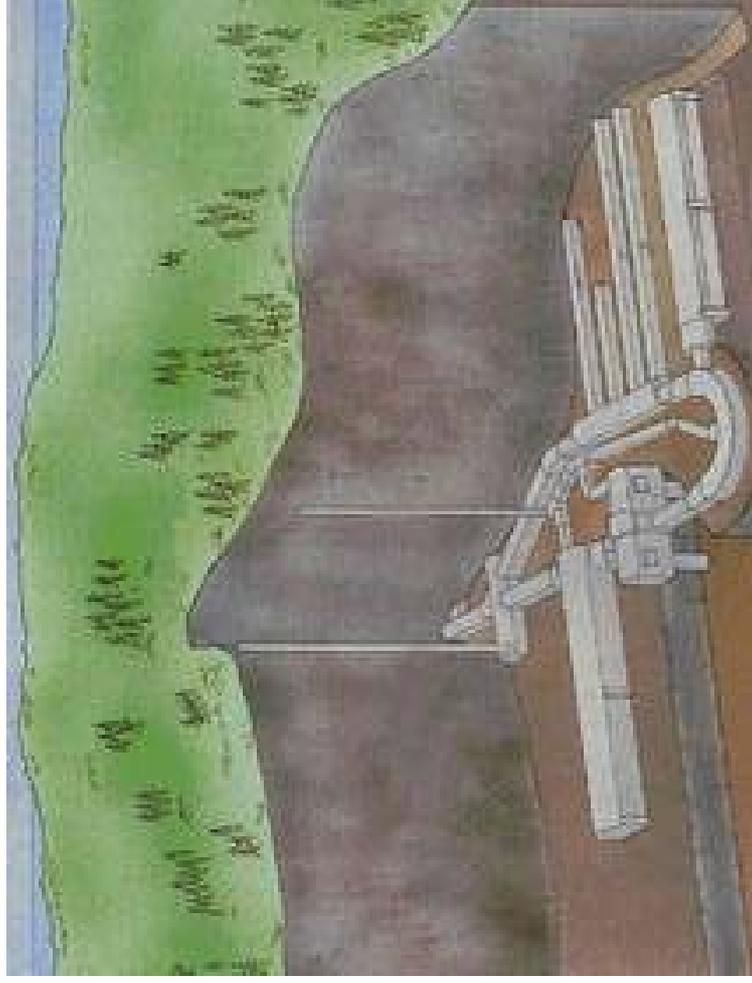


Рис. 3.36. Схема хранилища Ловинса (Финляндия)

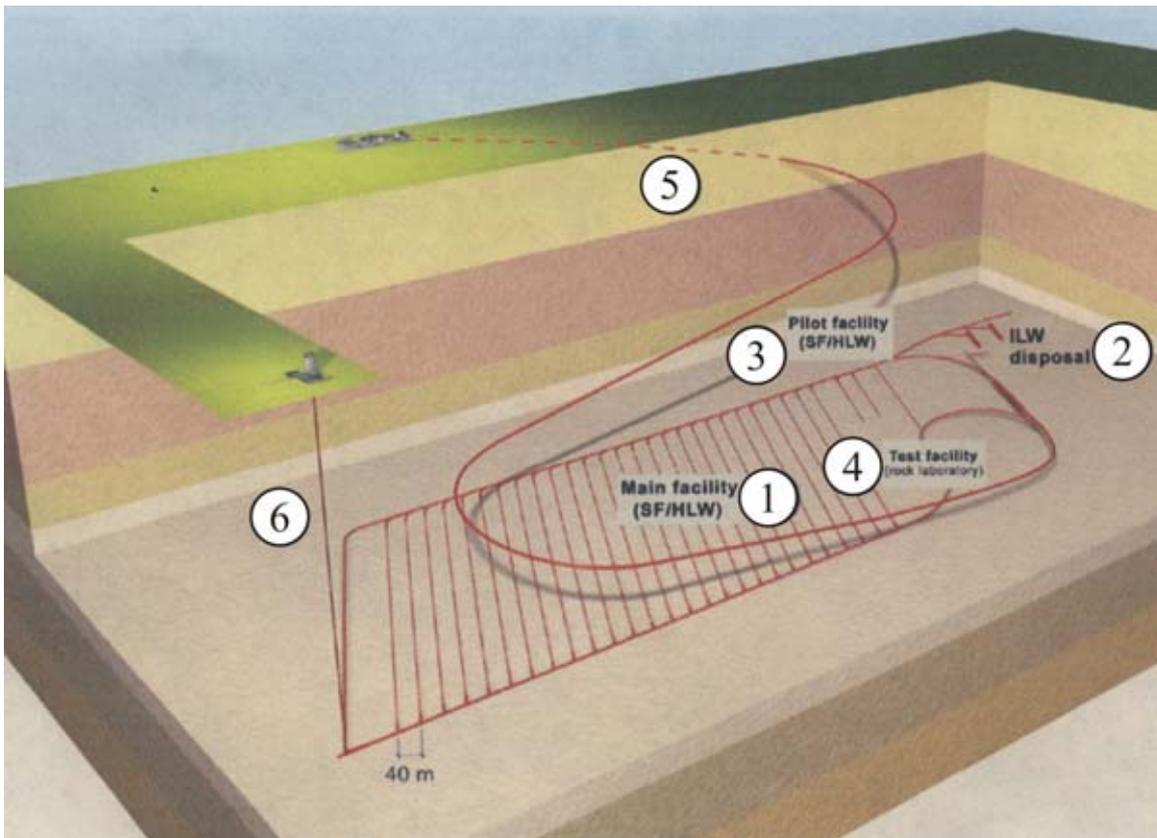


Рис. 3.38. Схема подземного комплекса хранилища ядерных отходов (Швейцария)

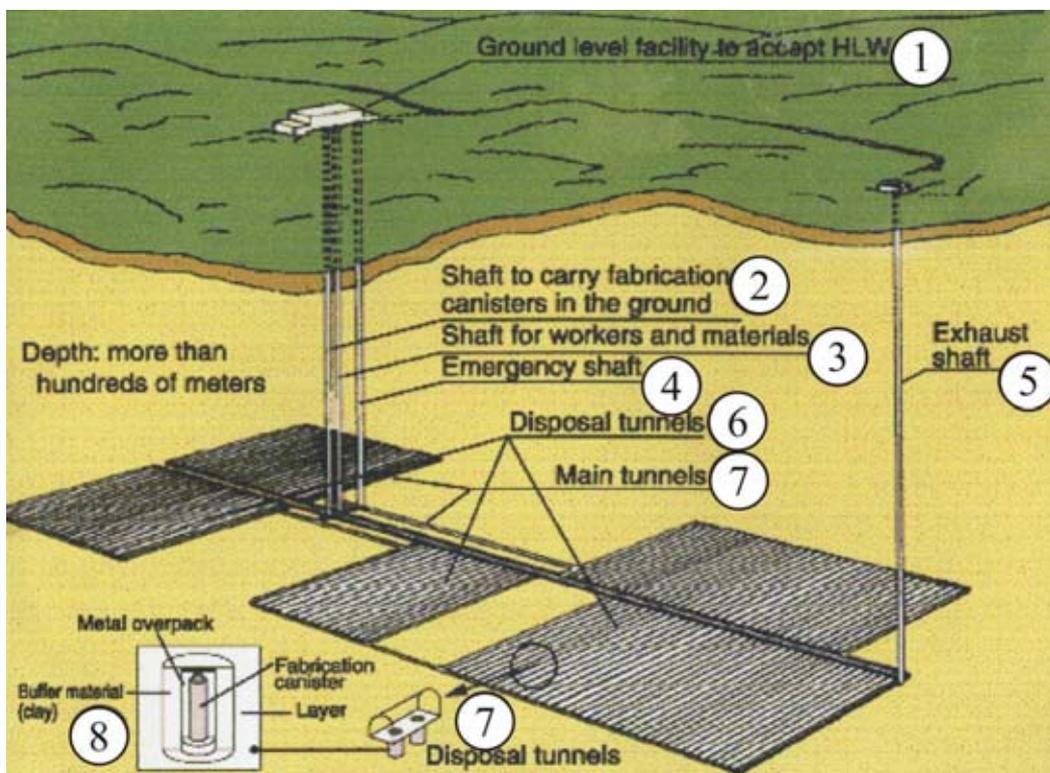


Рис. 3.39. Концепция подземного хранилища отходов с высоким уровнем радиоактивности

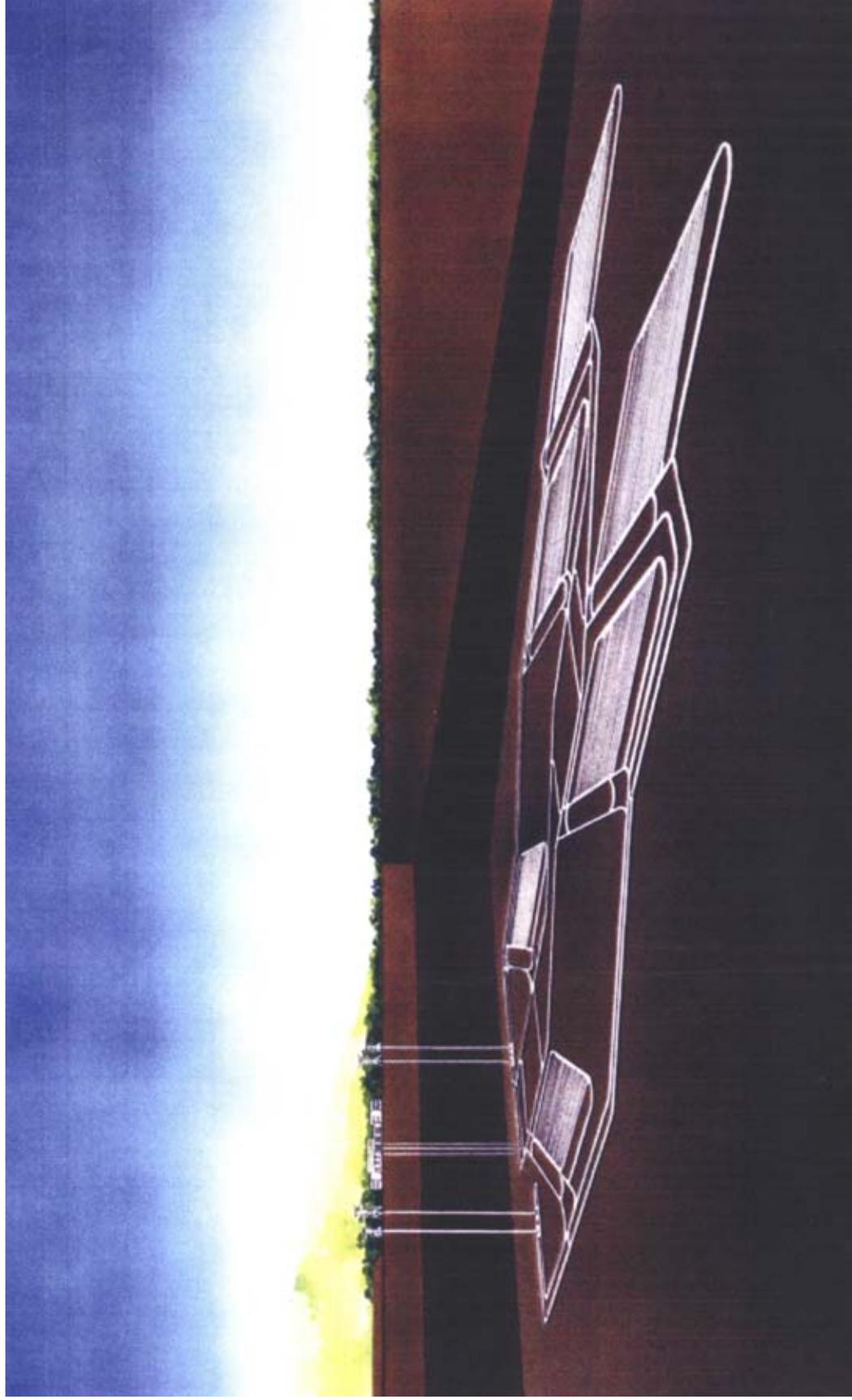


Рис. 3.40. Японская концепция подземного хранения отходов с высоким уровнем радиоактивности

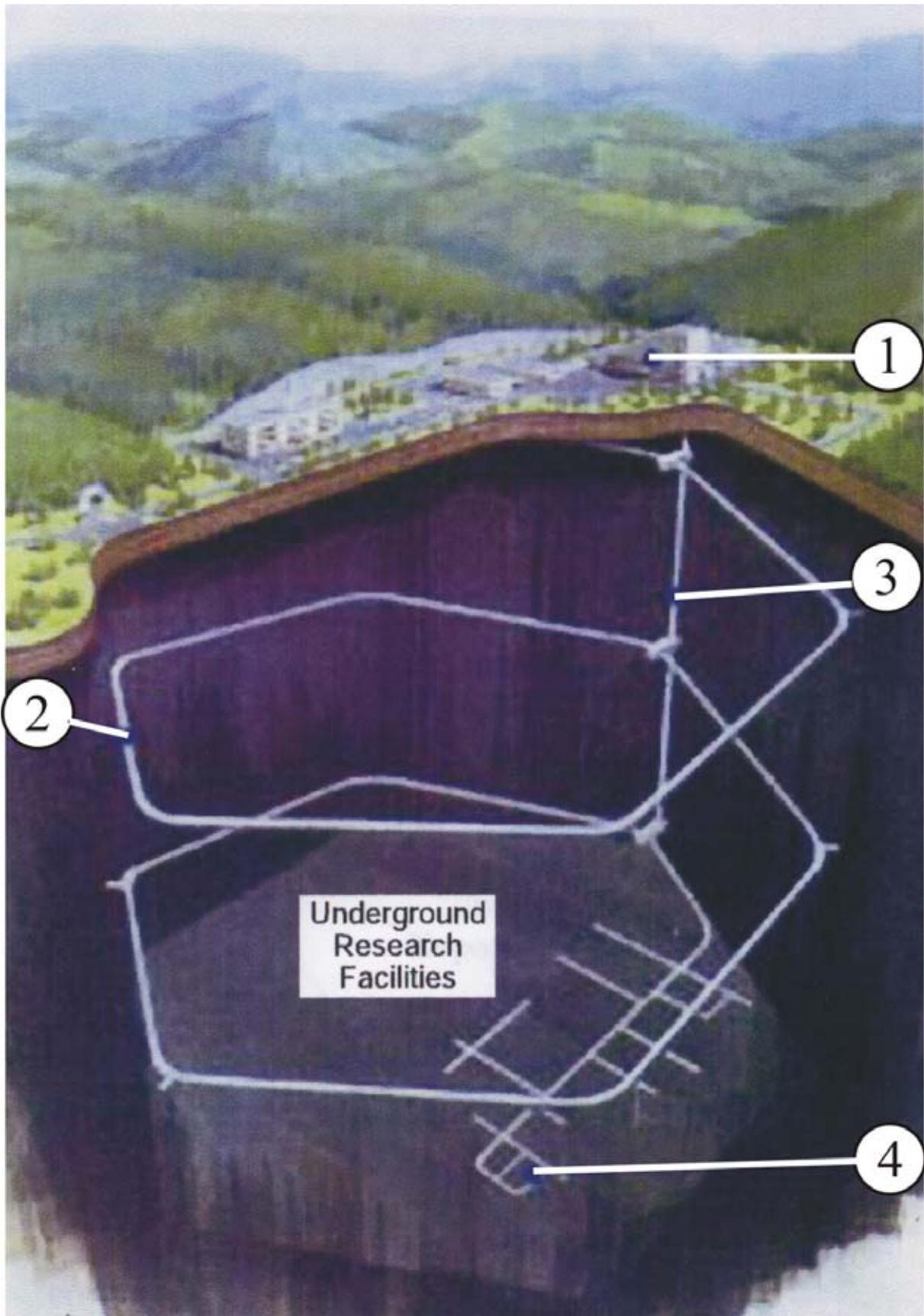


Рис. 3.41. Подземный комплекс лаборатории Хоронобе (Япония)

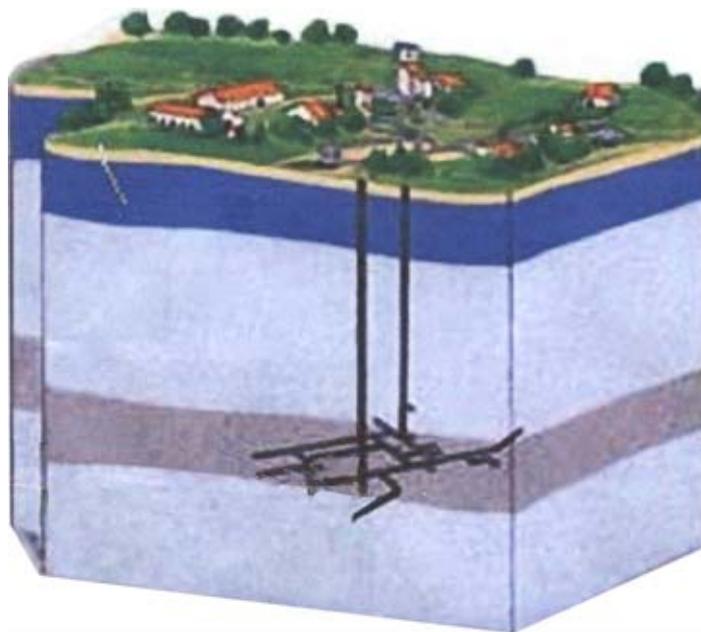


Рис. 3.42. Подземный комплекс лаборатории Франции

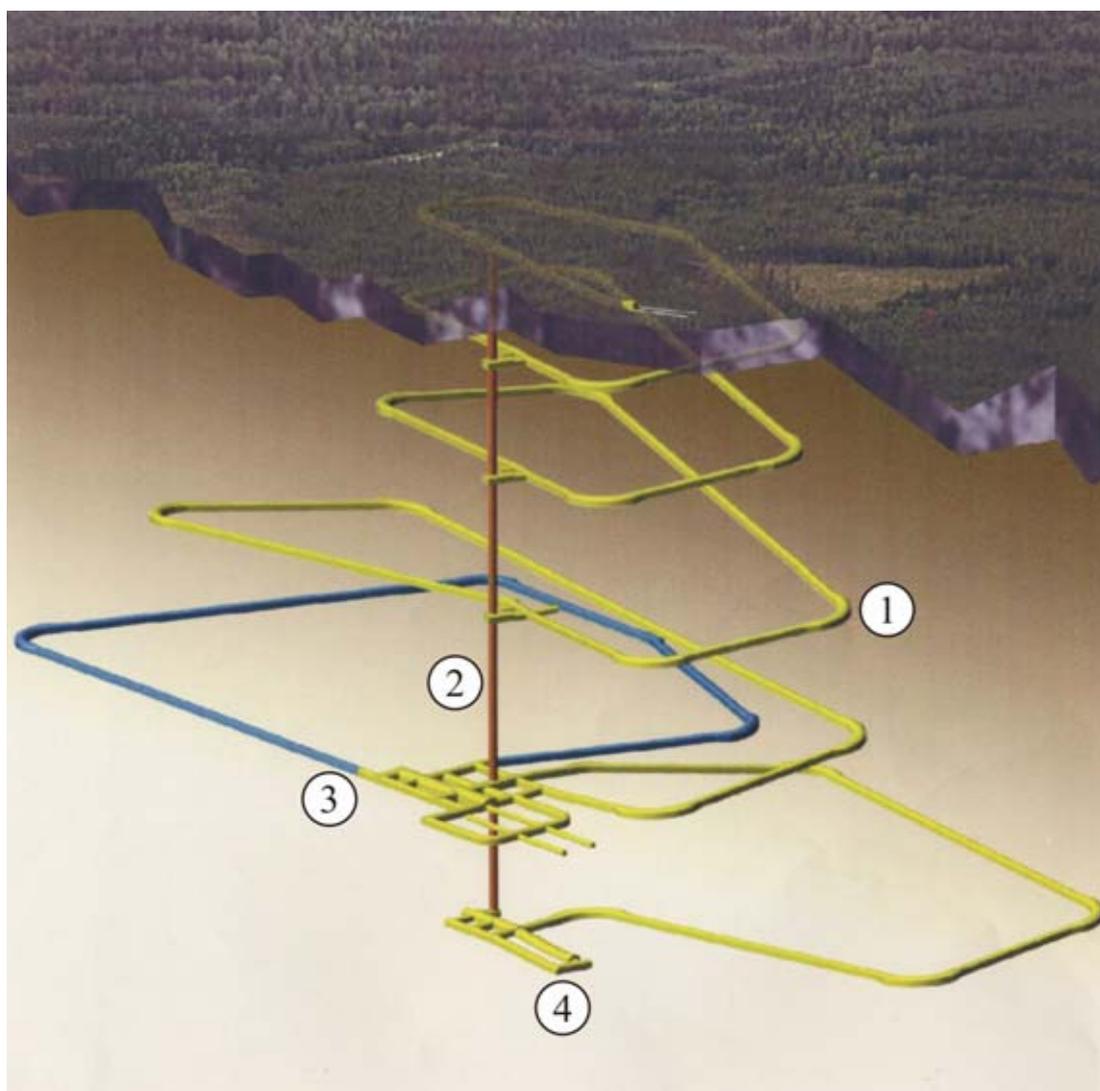


Рис. 3.43. Подземный комплекс лаборатории ONKALO (Финляндия)

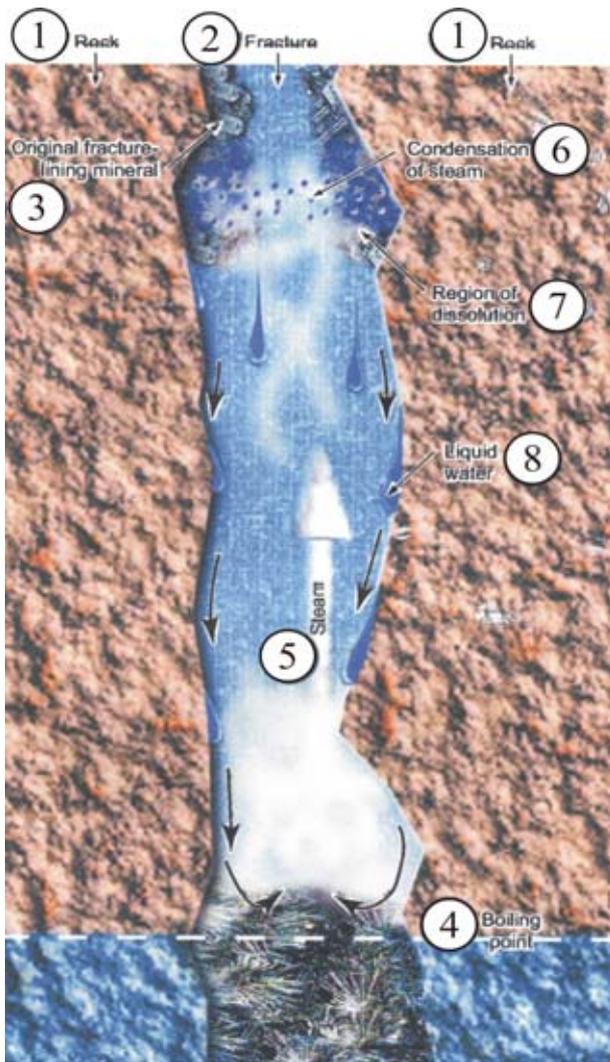


Рис. 3.48. Зона пород, примыкающих к туннелю хранения, нарушенных горными работами

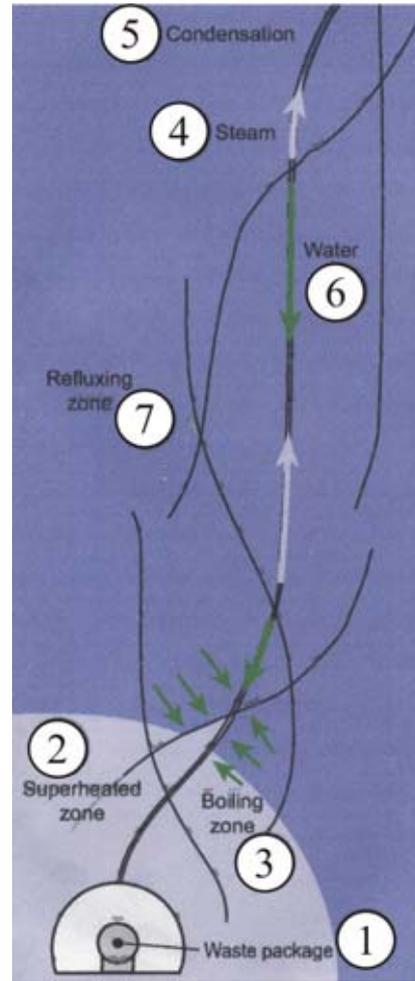


Рис. 3.49. Общая схема движения пароводяного потока в породах, перекрывающих туннель хранения отходов

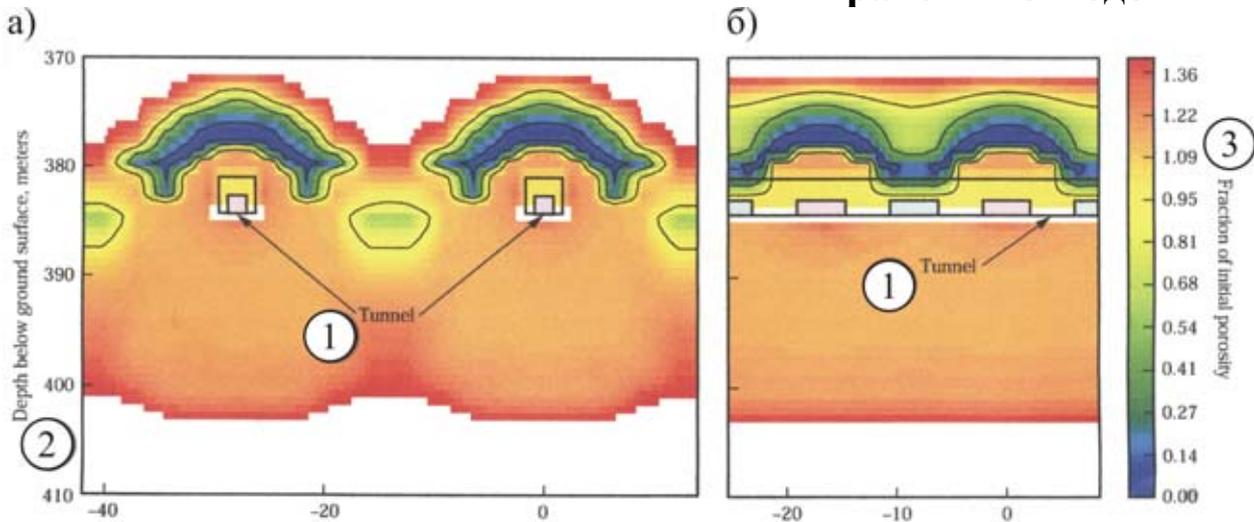


Рис. 3.50. Образование уплотненных куполов горных пород в своде туннелей хранения отходов

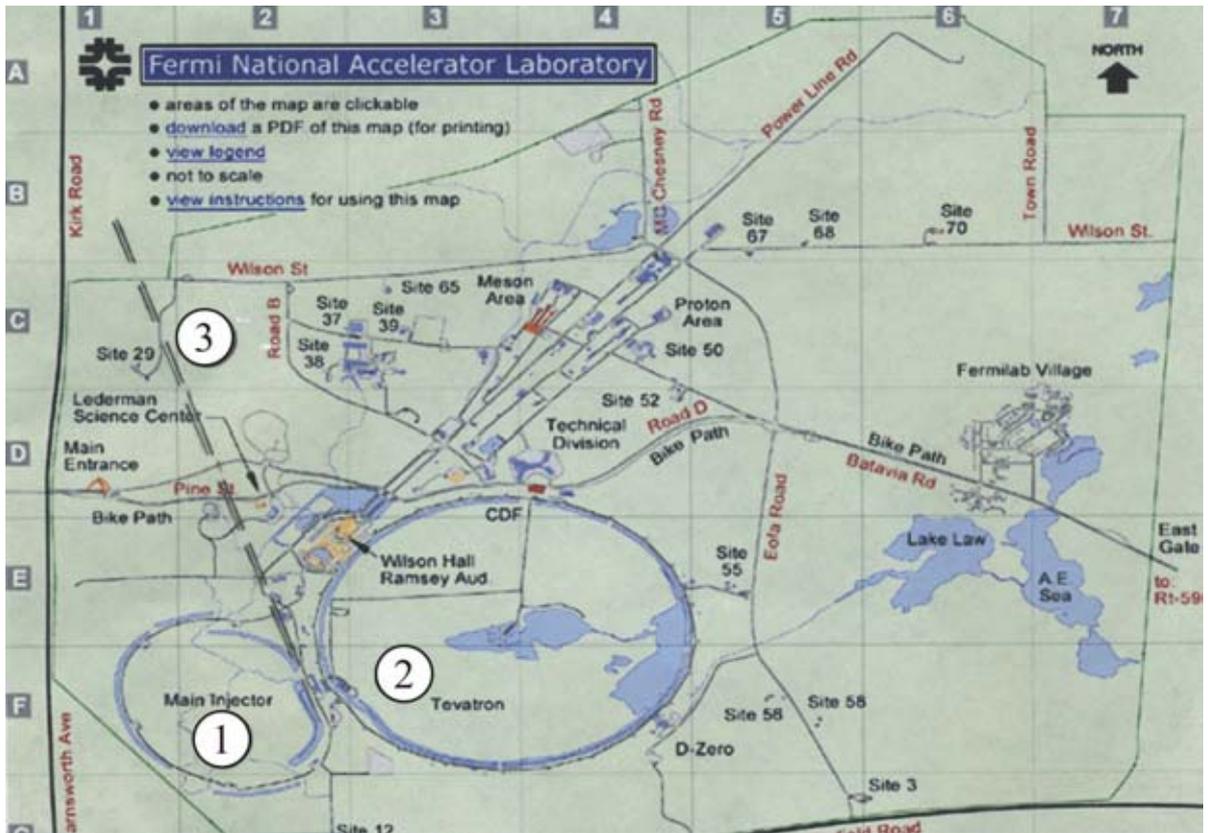


Рис. 4.4. Географическая схема комплекса Фермилаб



Рис. 4.5. Вид с воздуха на комплекс Фермилаб



**Рис. 4.6. Секция подземной установки линейного ускорителя
лаборатории Фермилаб**

а)



б)

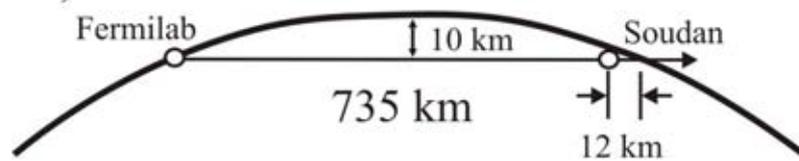


Рис. 4.7. Схема проекта NUMI-MINOS – траектория частиц между лабораториями Фермилаб и Саудан

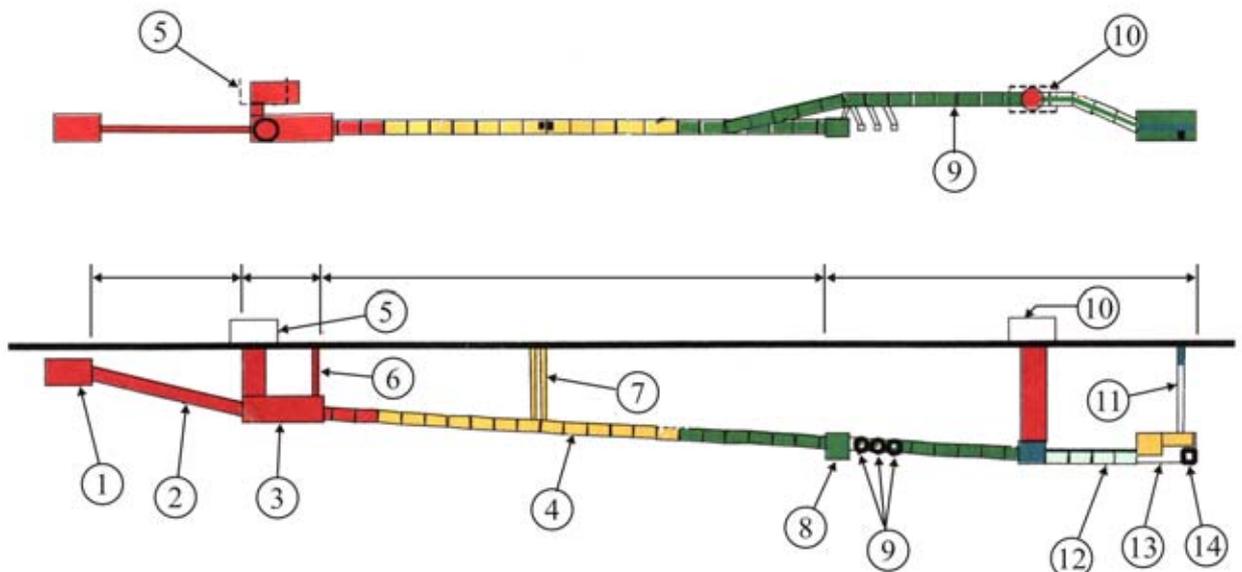


Рис. 4.8. План и разрез подземного комплекса NUMI-MINOS



Рис. 4.9. Монтаж детектора NuMi



Рис. 4.10. Туннель распада (Decay Tunnel) лаборатории Фермилаб

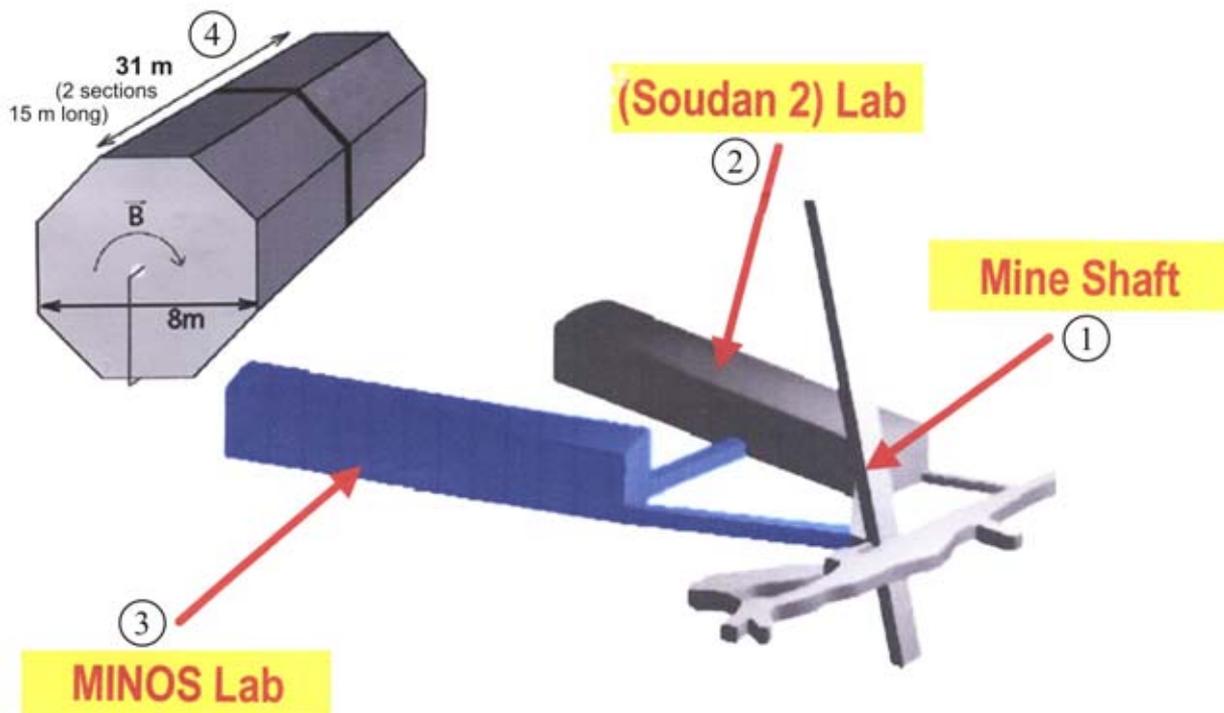


Рис. 4.11. Схема подземного лабораторного комплекса Саудан-2 (27 горизонт шахты)



Рис. 4.12. Строительство полости «дальнего» детектора MINOS в шахте Саудан

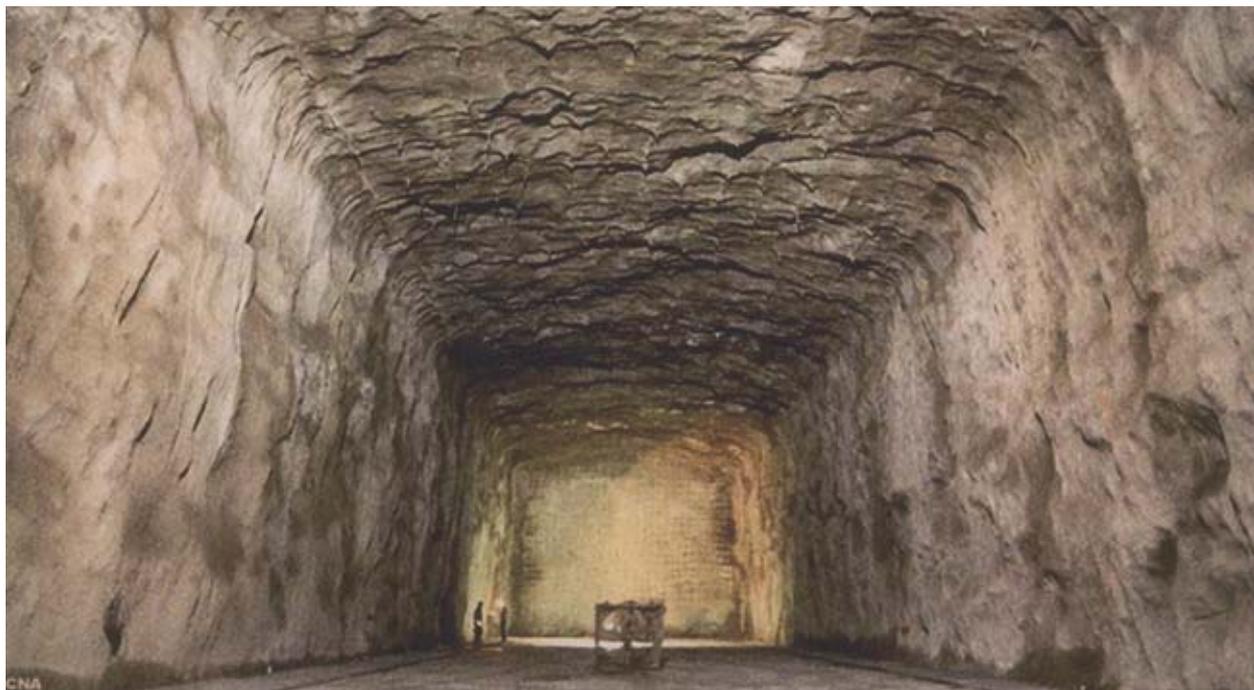


Рис. 4.13. Подземная полость лаборатории Саудан, закрепленная анкерными болтами



Рис. 4.14. Детектор MINOS в шахте Саудан



Рис .4.15. Монтаж оборудования в лаборатории Саудан-2

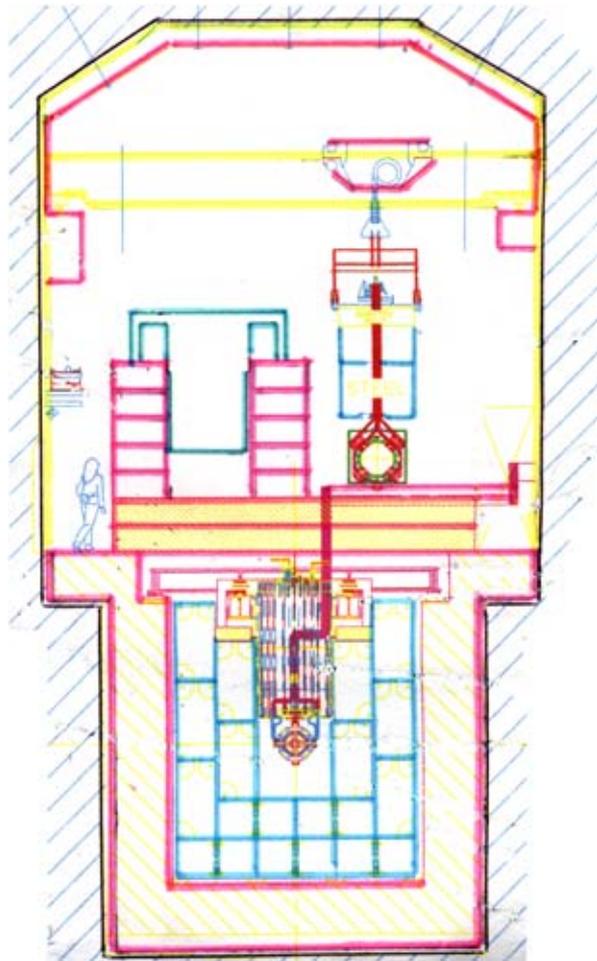


Рис. 4.17. Размещение оборудования в зале мишени («Target Hall») лаборатории Фермилаб

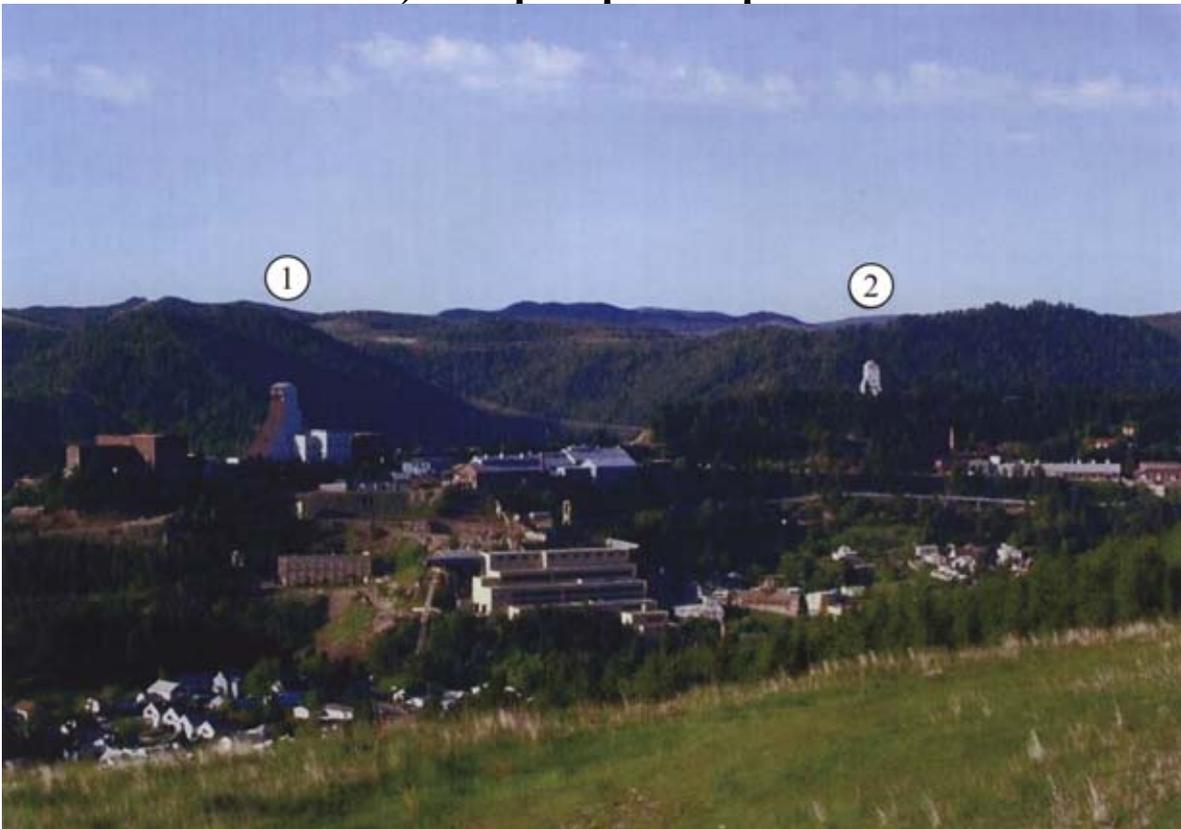


Рис. 4.18. Общий вид поверхности шахты Хоумстейк

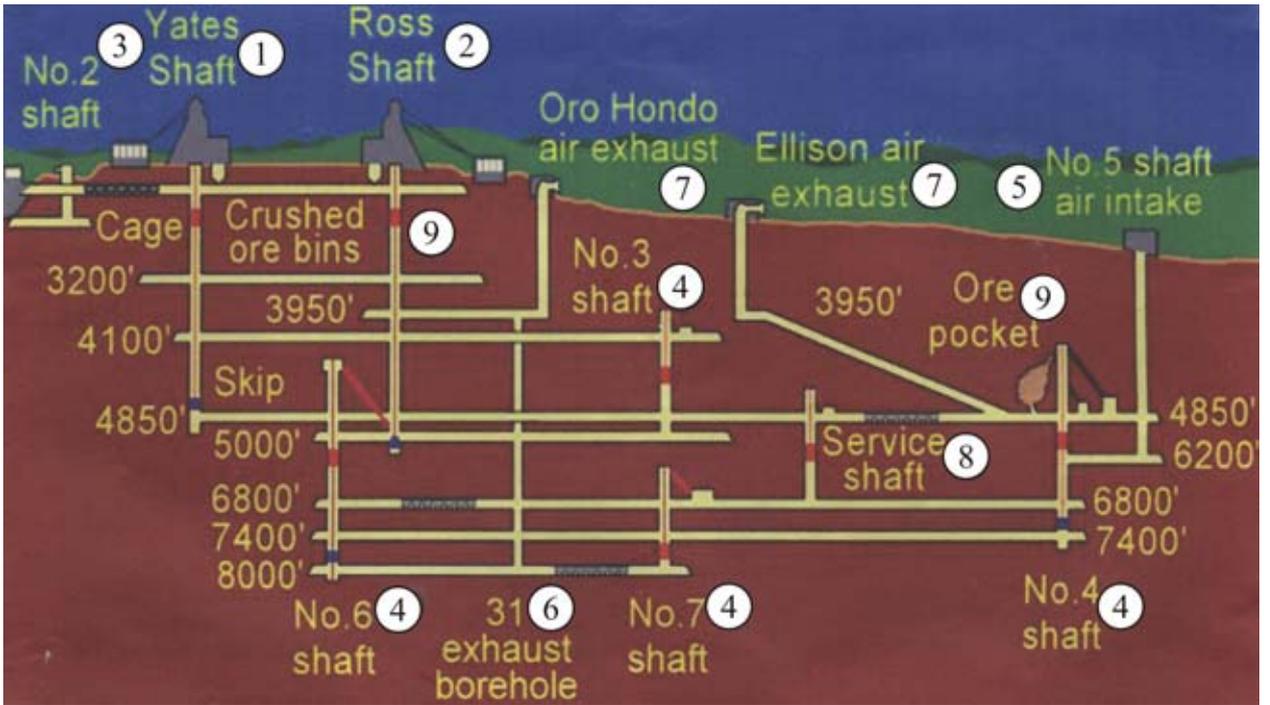


Рис. 4.19. Схема вскрытия месторождения шахты Хоумстейк

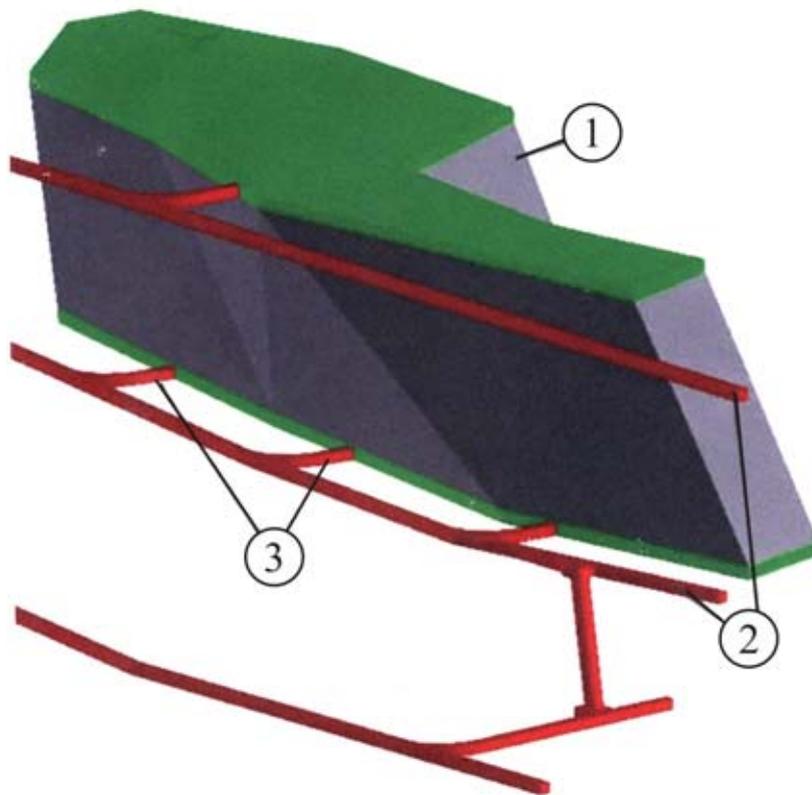


Рис. 4.20. Схема вскрытия рудного тела участковыми выработками



Рис. 4.28. Общий вид полости большого размера, закрепленной анкерной крепью с поддерживающей сеткой

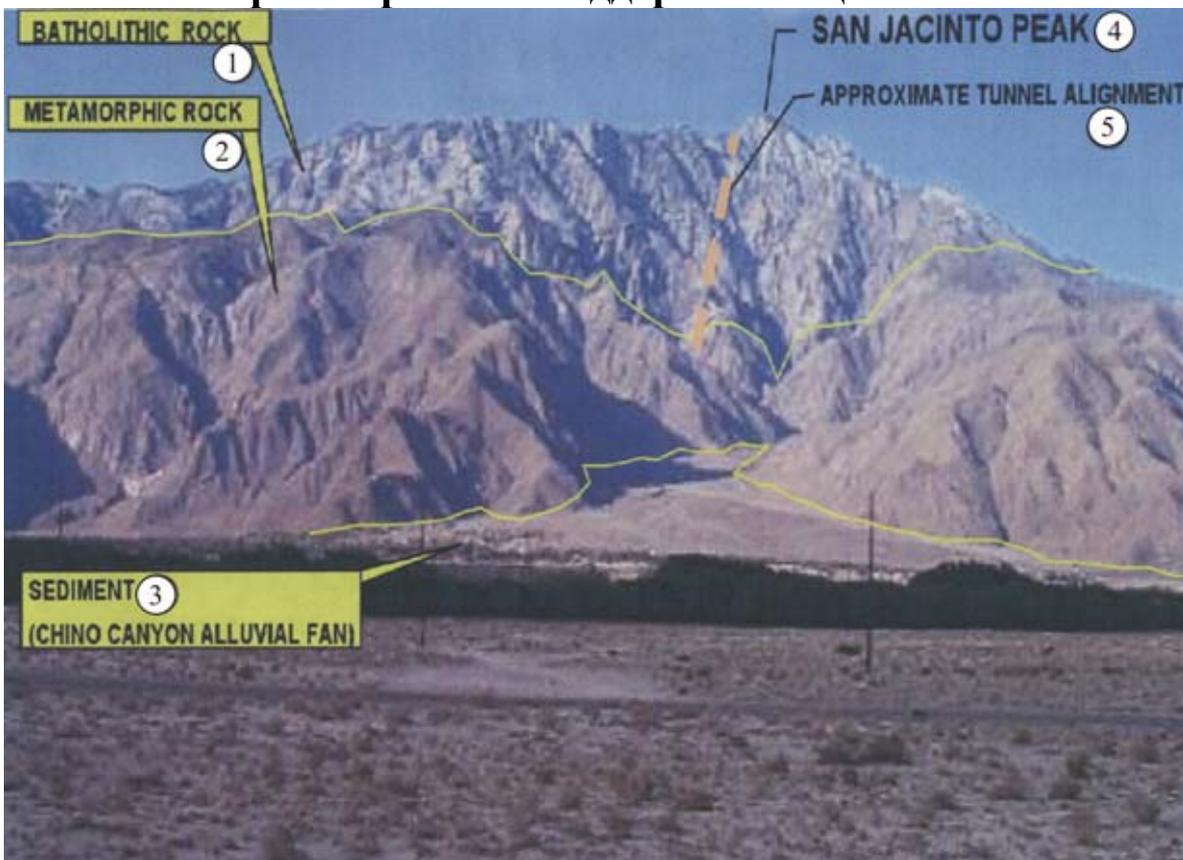


Рис. 4.31. Кряж Сан-Джасинто в месте расположения туннеля, подводщего к подземной лаборатории

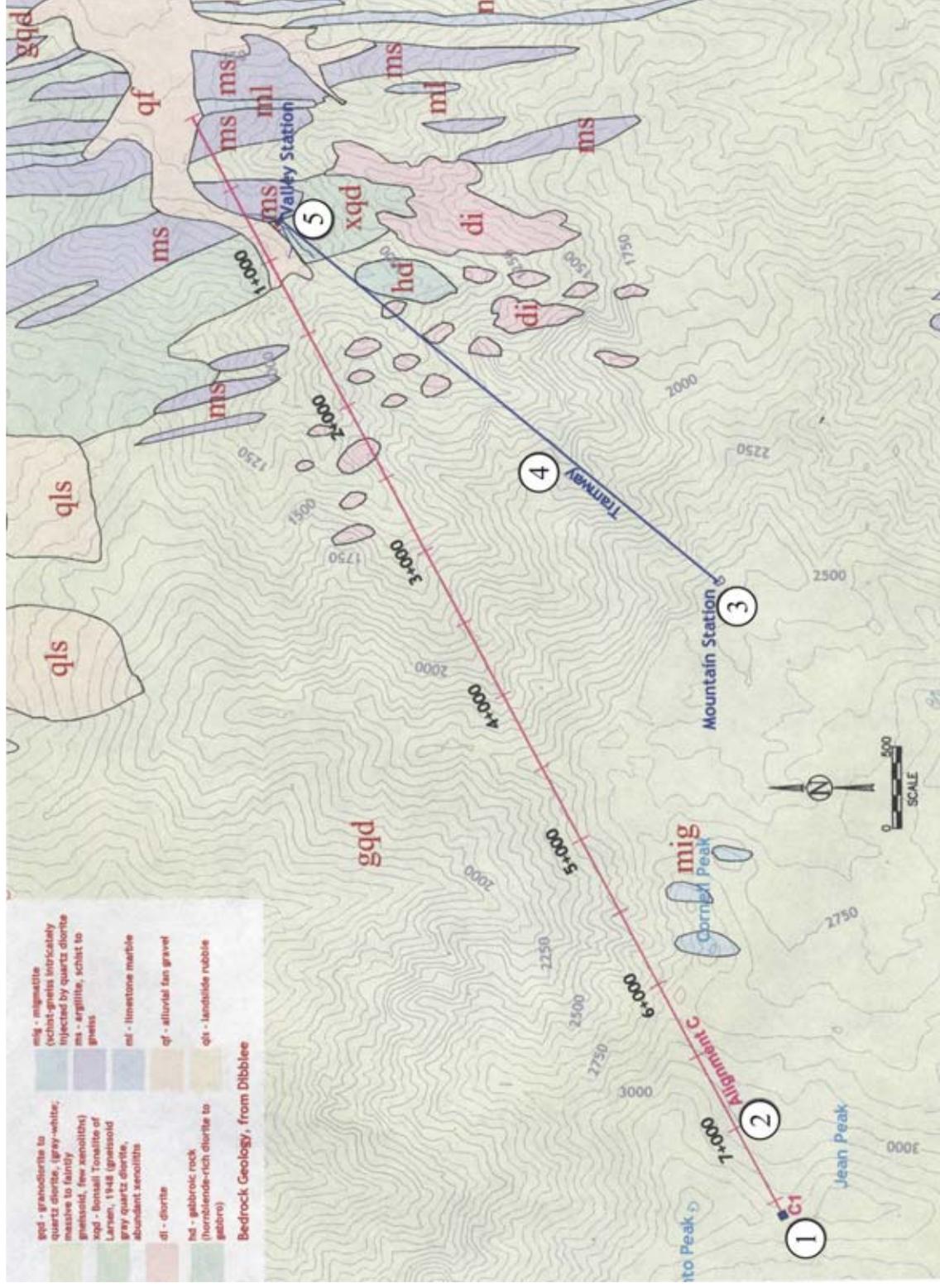


Рис. 4.32. Совмещенные топографическая и геологическая карты участка проходки туннеля к лаборатории Сан-Джасинто

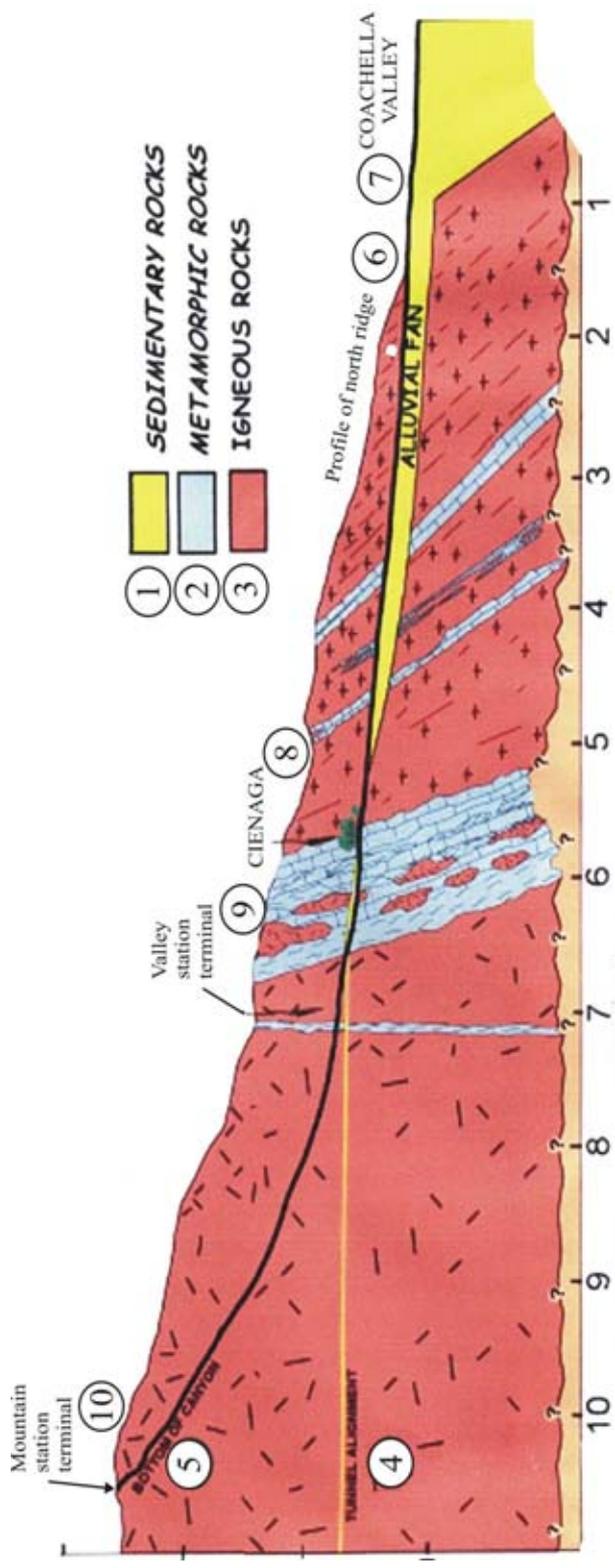


Рис. 4.33.
Геологический
разрез по трассе
туннеля Сан-
Джасинто

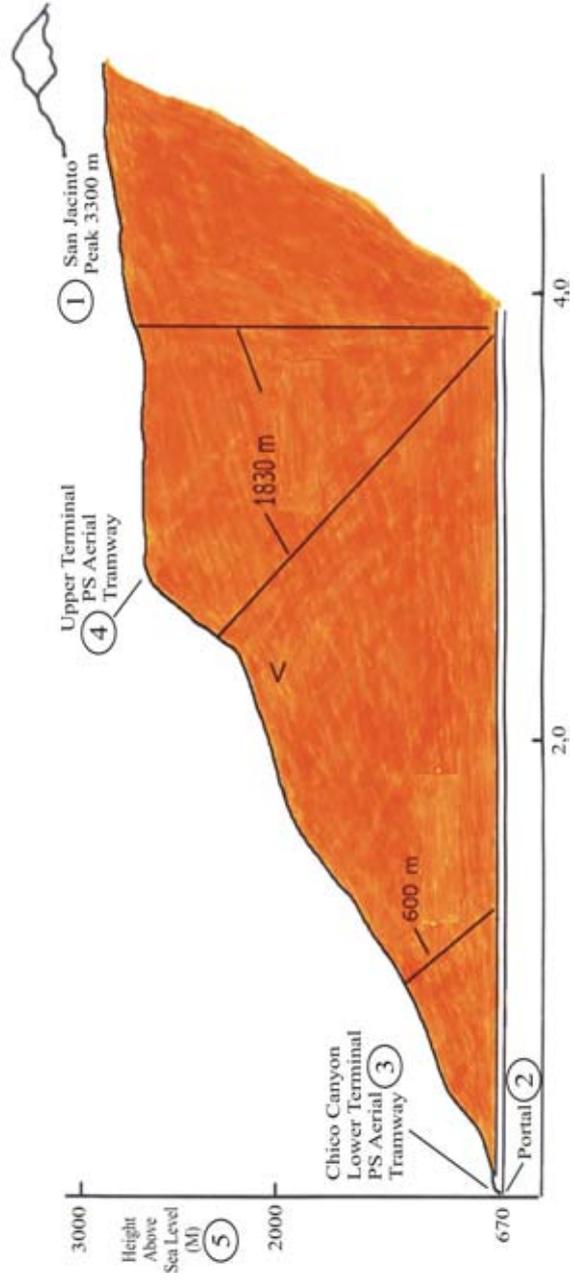


Рис. 4.34. Профиль
 горного гребня в месте
 расположения
 лабораторного туннеля

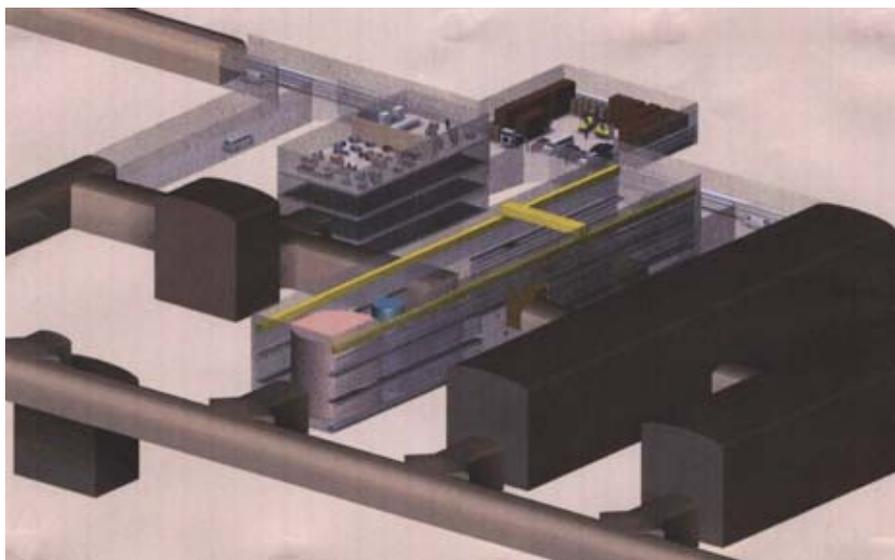


Рис. 4.37. Макет одного из вариантов подземных помещений лаборатории Сан-Джасинто



Рис. 4.38. Интерьер одного из подземных помещений лаборатории Сан-Джасинто



Рис. 4.39. Вход (портал) в туннель шахты Мозуми (лаборатория Камиока)

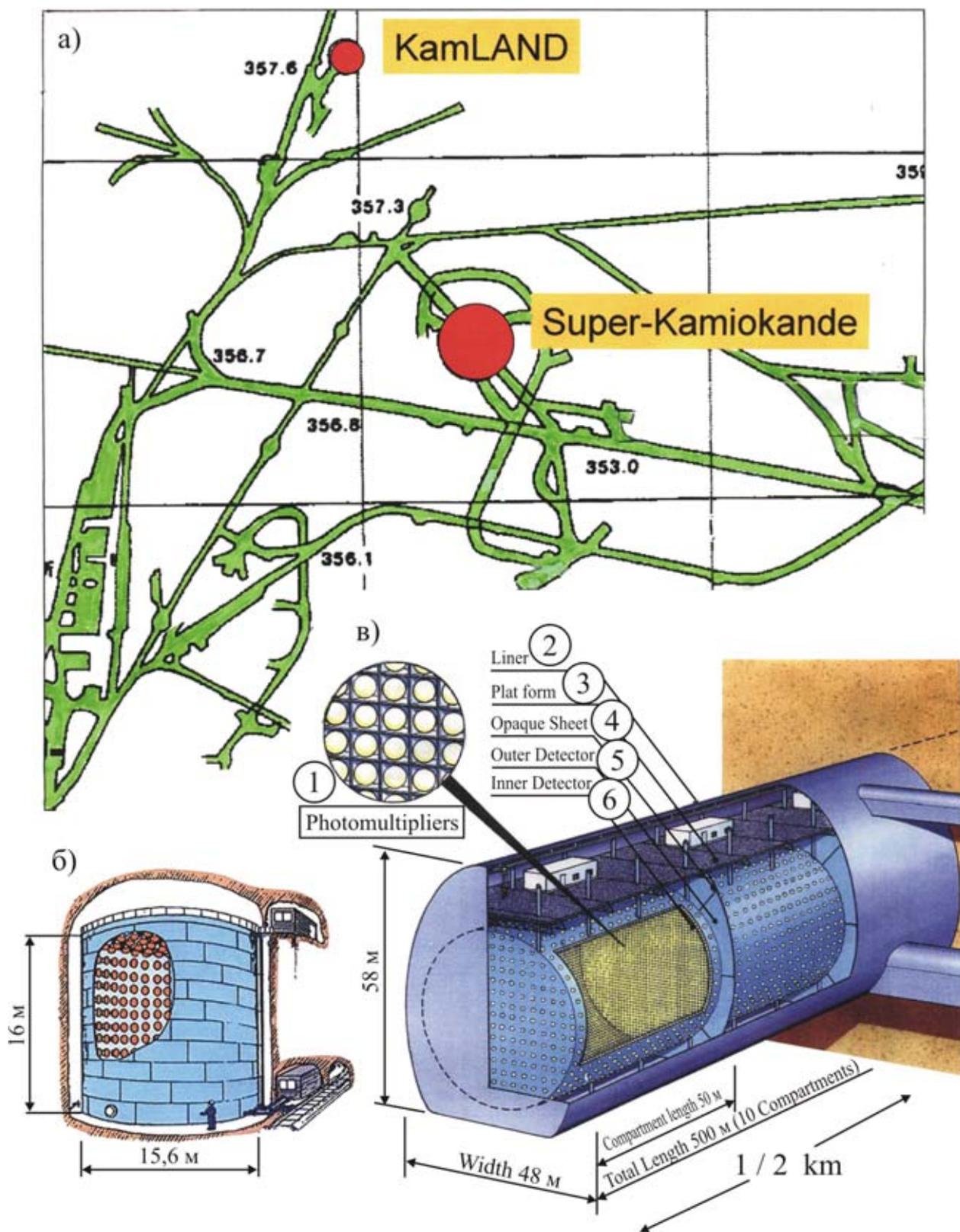


Рис. 4.40. Схема расположения научных комплексов в подземных выработках шахты Мозуми (лаборатория Камиока)

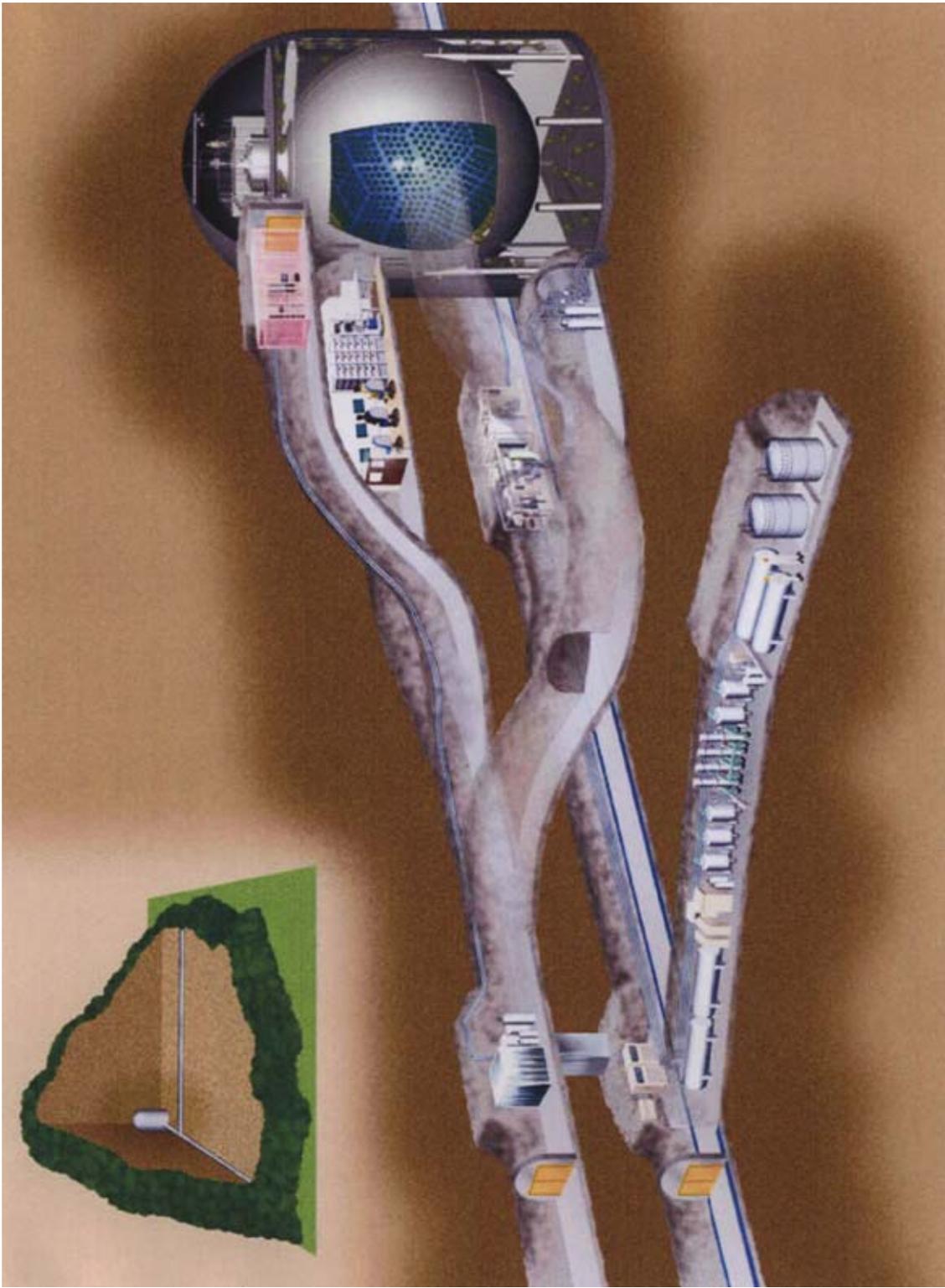


Рис. 4.41. Схема установки детектора KamLAND в шахте Мозуми

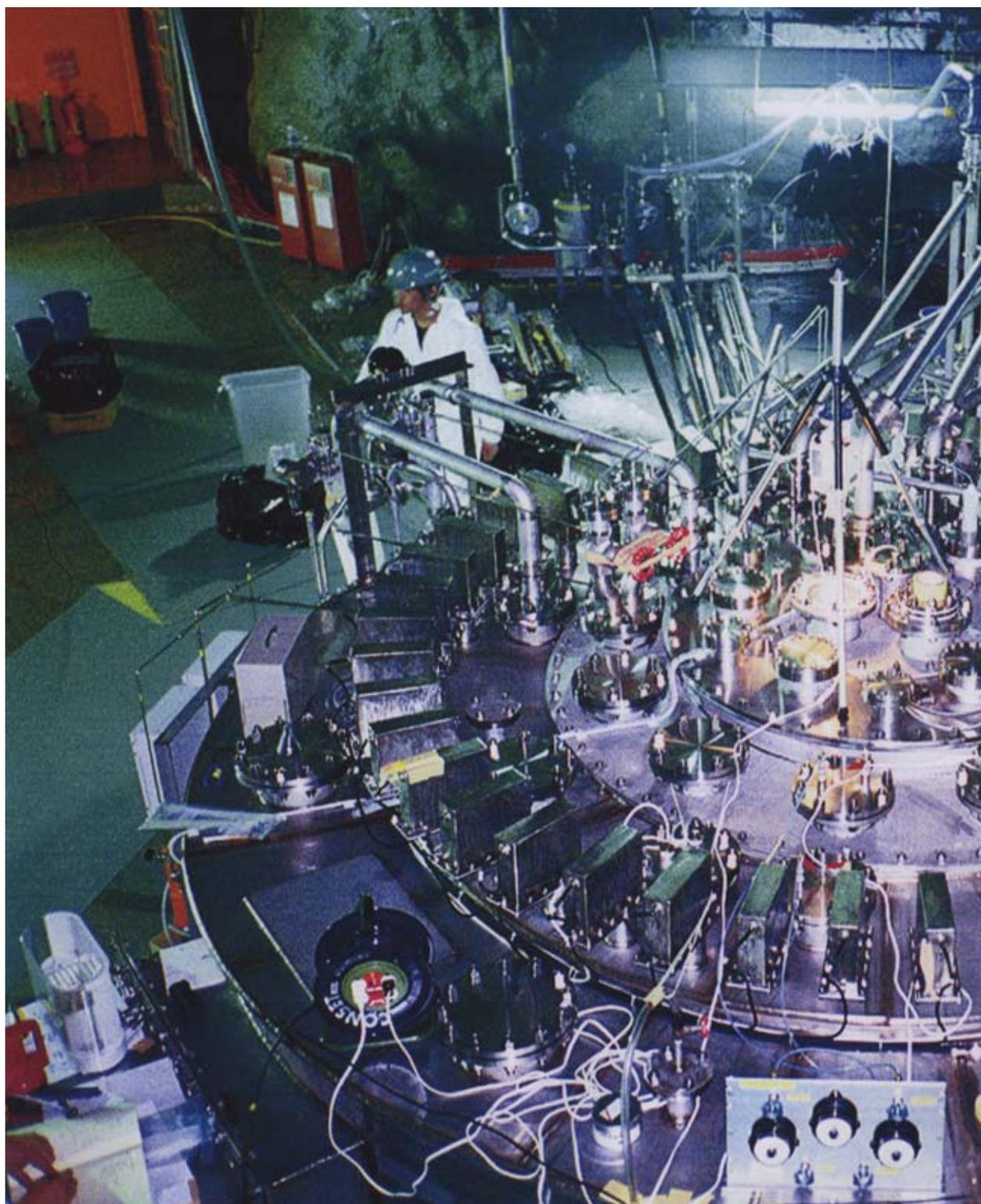


Рис. 4.42. Монтажные работы в камере детектора KamLAND

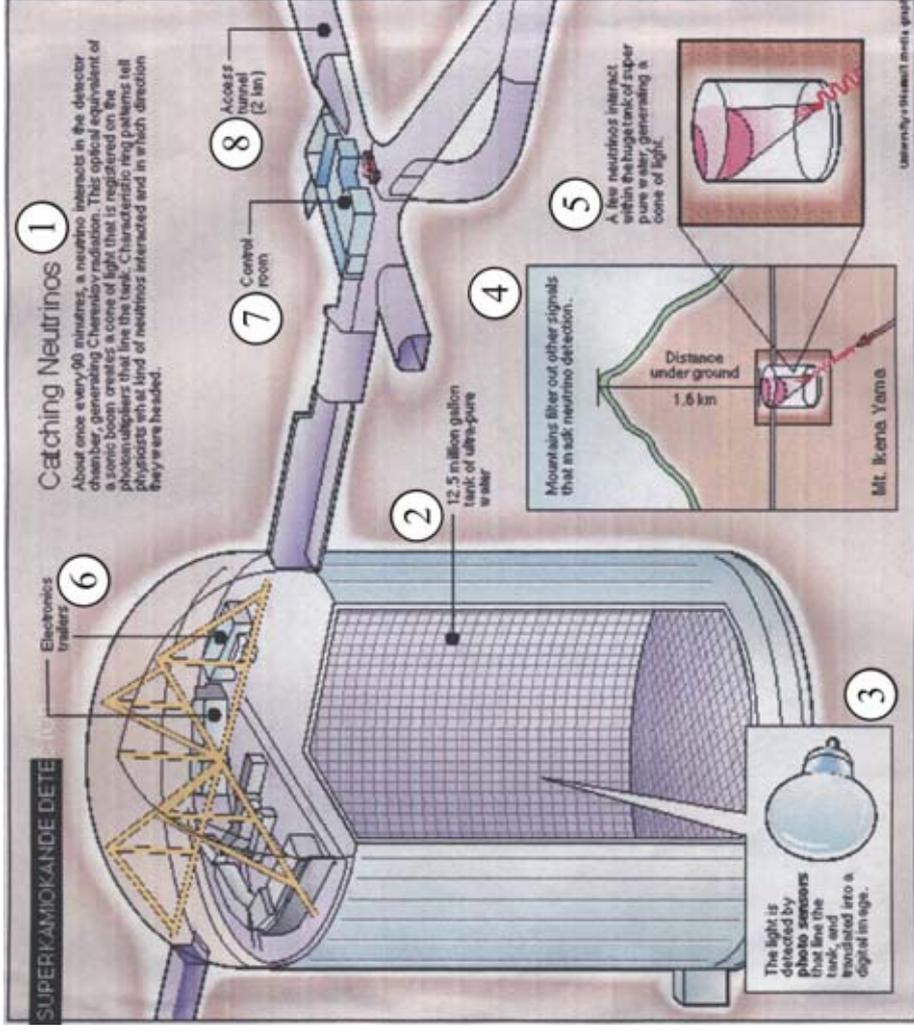
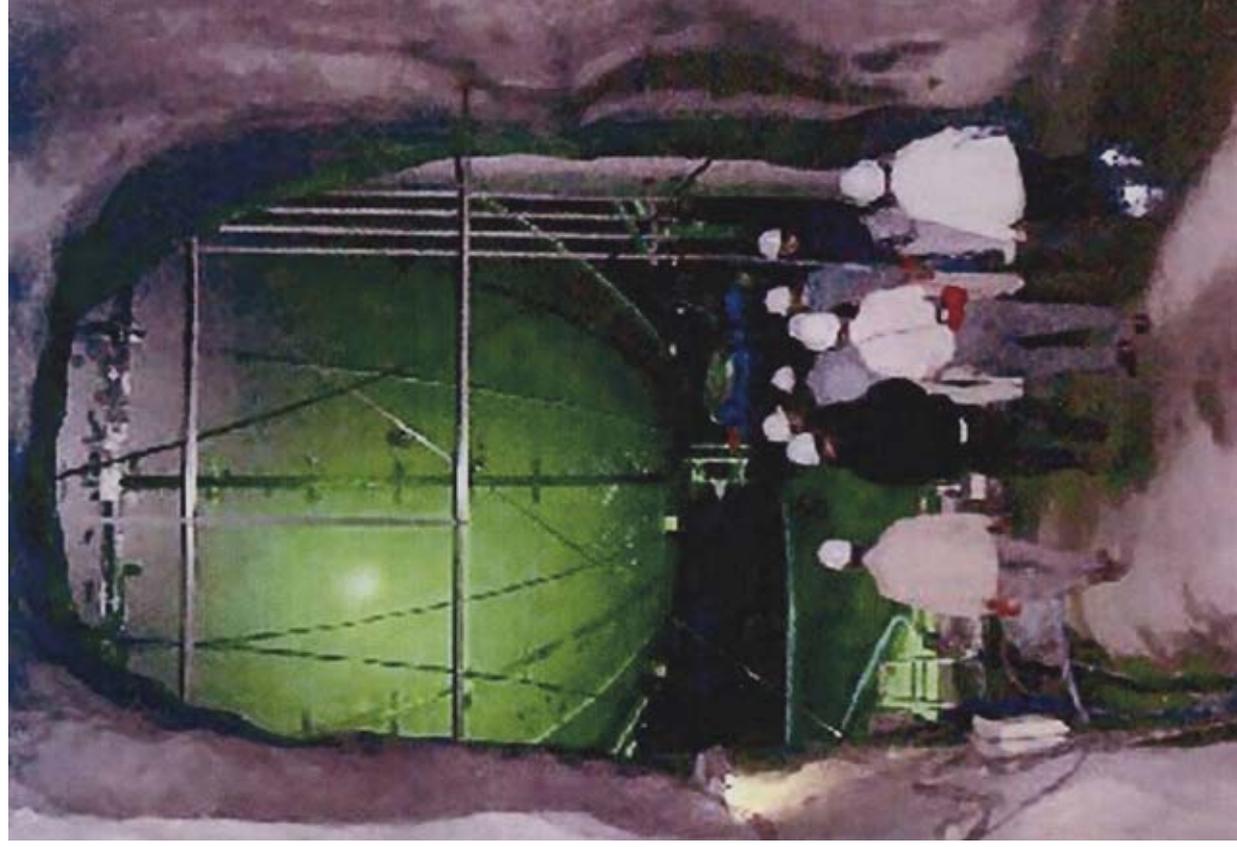


Рис. 4.44. Схема устройства и работы детектора «Суперкамиокаде»

Рис. 4.43. Детектор KamLAND в подземной полости шахты Мозуми

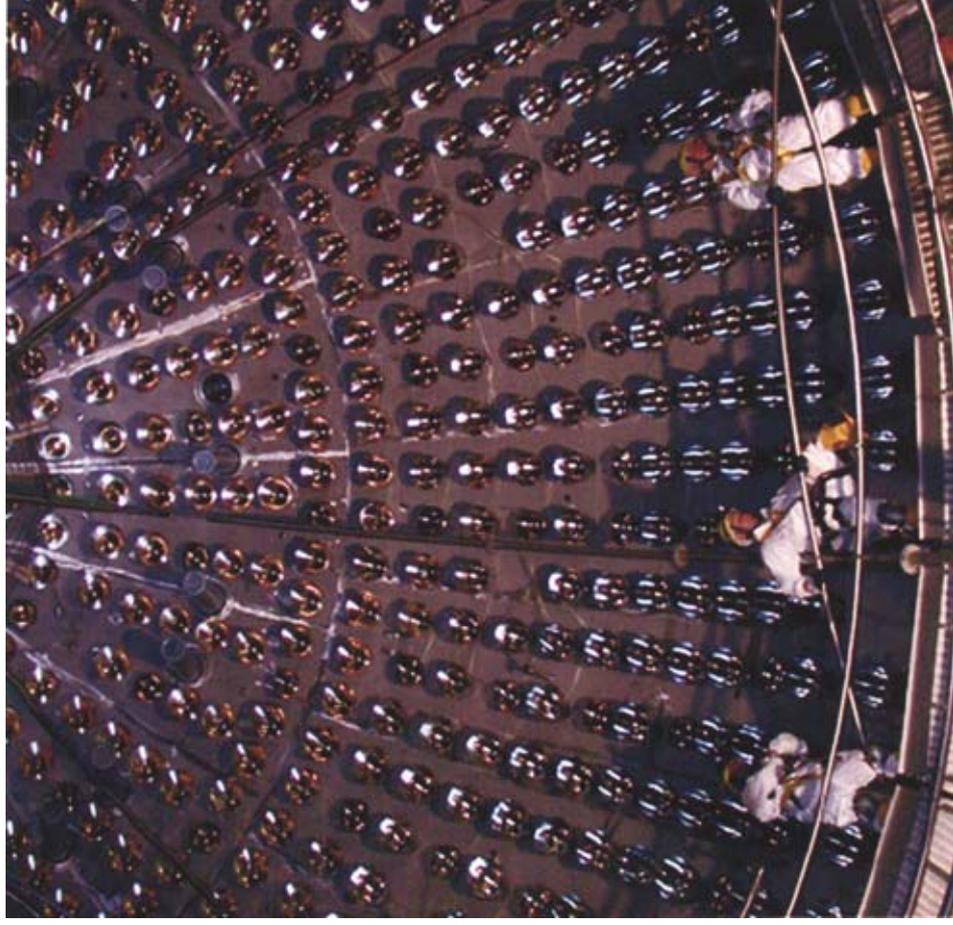


Рис. 4.46. Детектор «Суперкамиокаде». Вид изнутри

Рис. 4.45. Подземная плоть для размещения детектора «Суперкамиокаде»

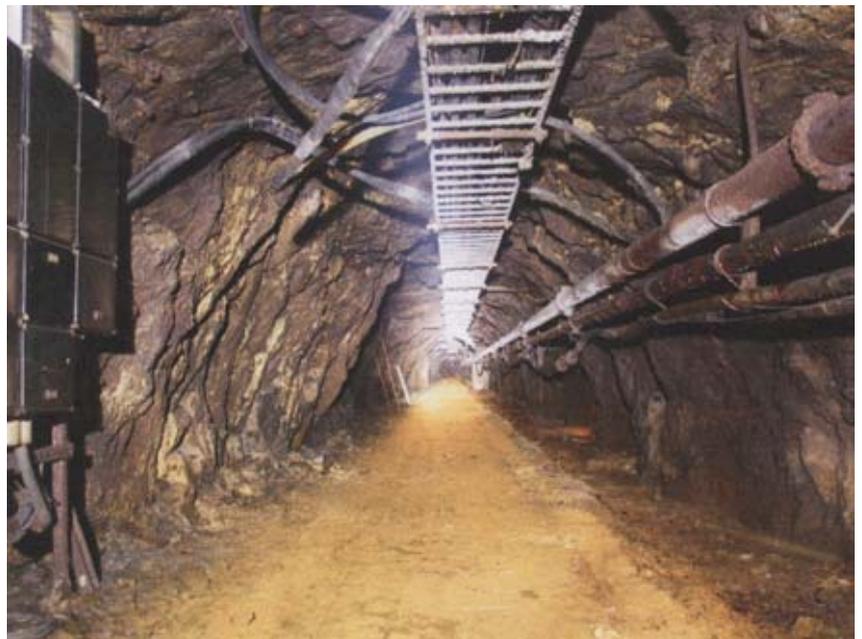


Рис. 4.47. Вид с воздуха на промплощадку шахты Пихасалми и прилегающий ландшафт



Рис. 4.48. Карта Финляндии с расположением г. Пихаярви и шахты Пихасалми

Рис. 4.49. Полость на гор. 210 м шахты Пихасалми



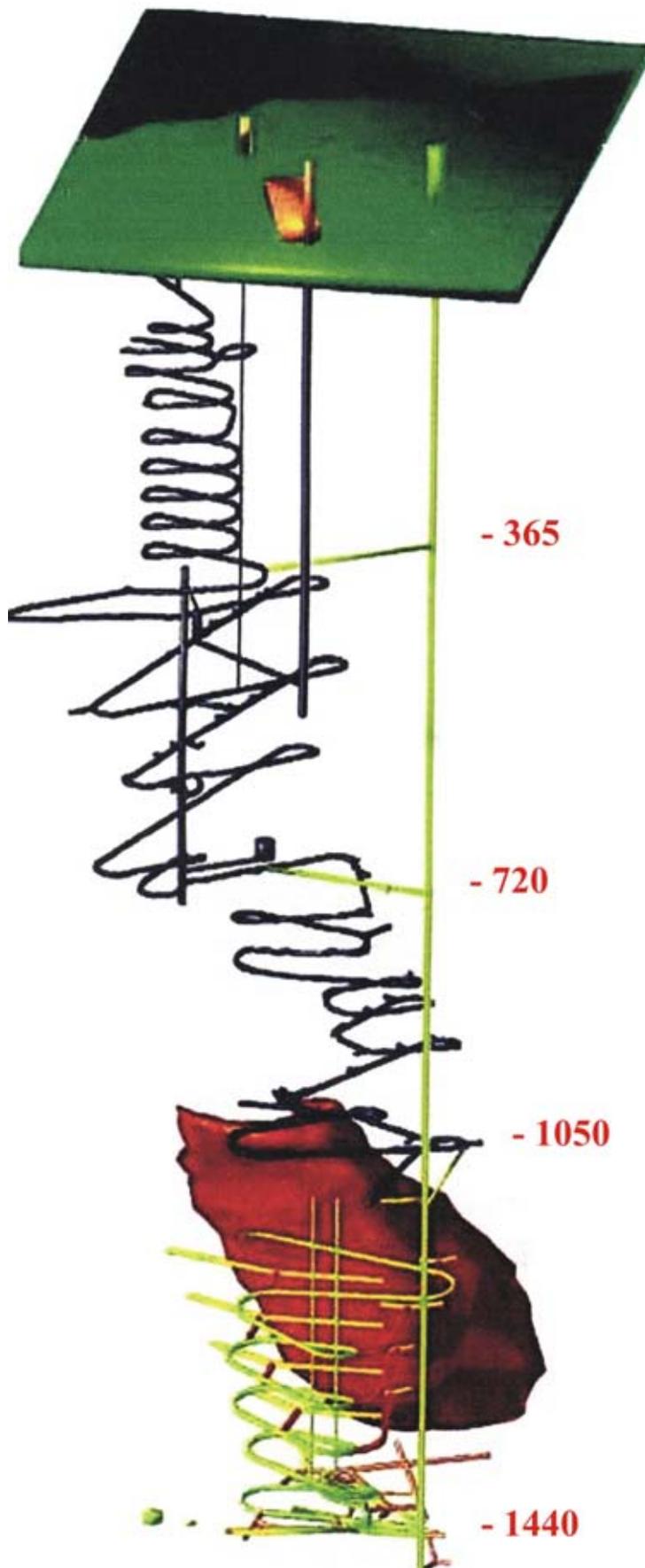


Рис. 4.50. Комплекс вскрывающих выработок существующей и новой (углубляемой) частей шахты Пихасалми

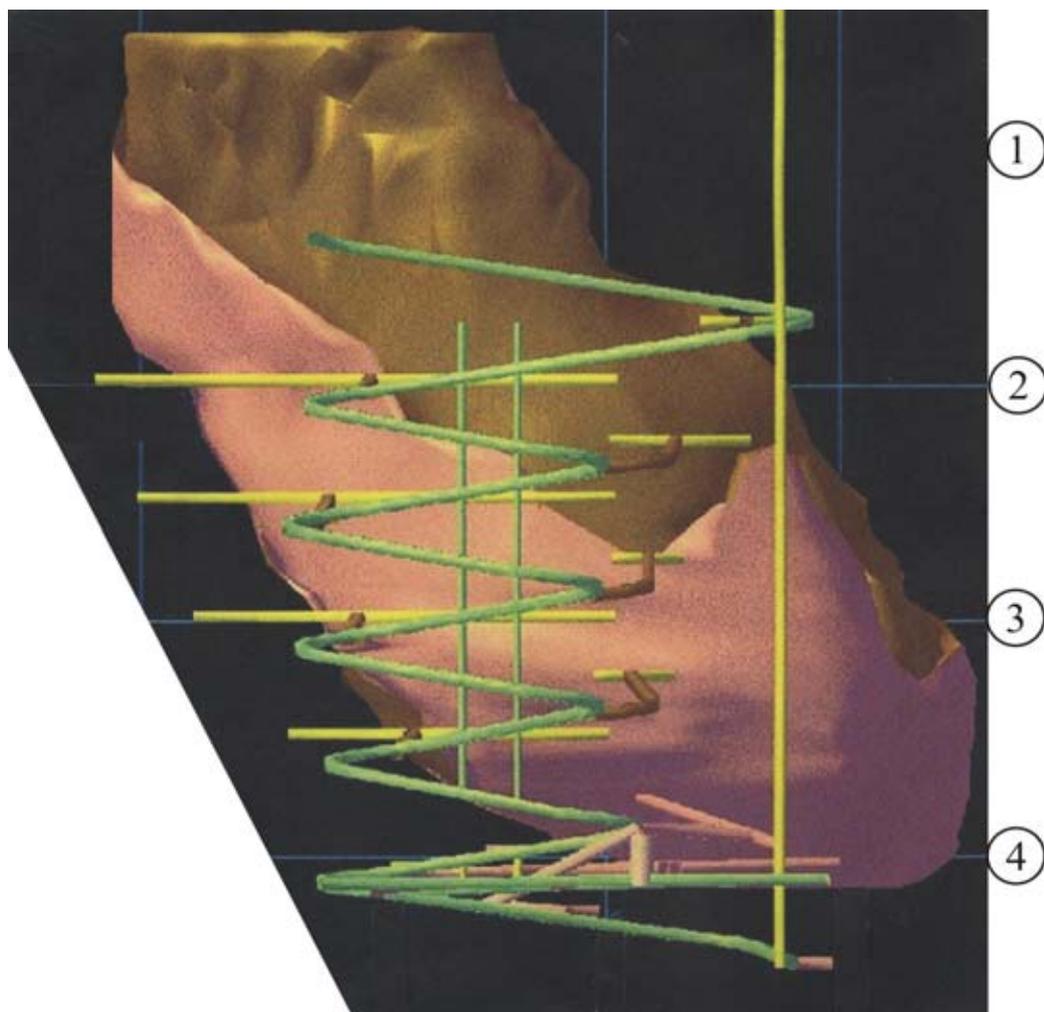


Рис. 4.51. Вскрытие нижней части месторождения шахты Пихасалми

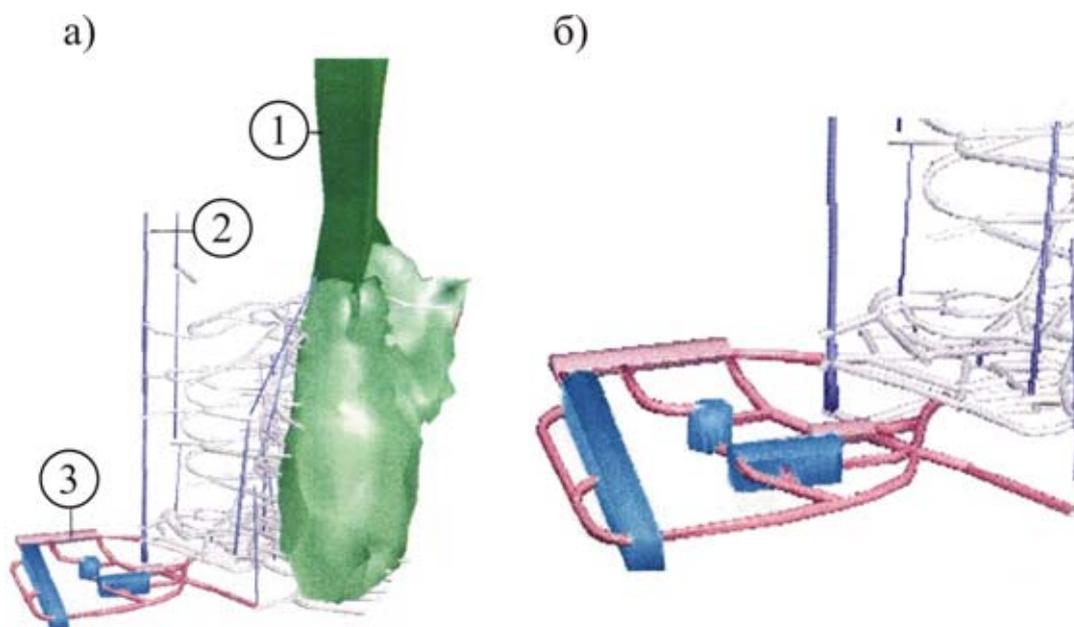


Рис. 4.52. Перспективный комплекс научных лабораторий на гор. 1440 м

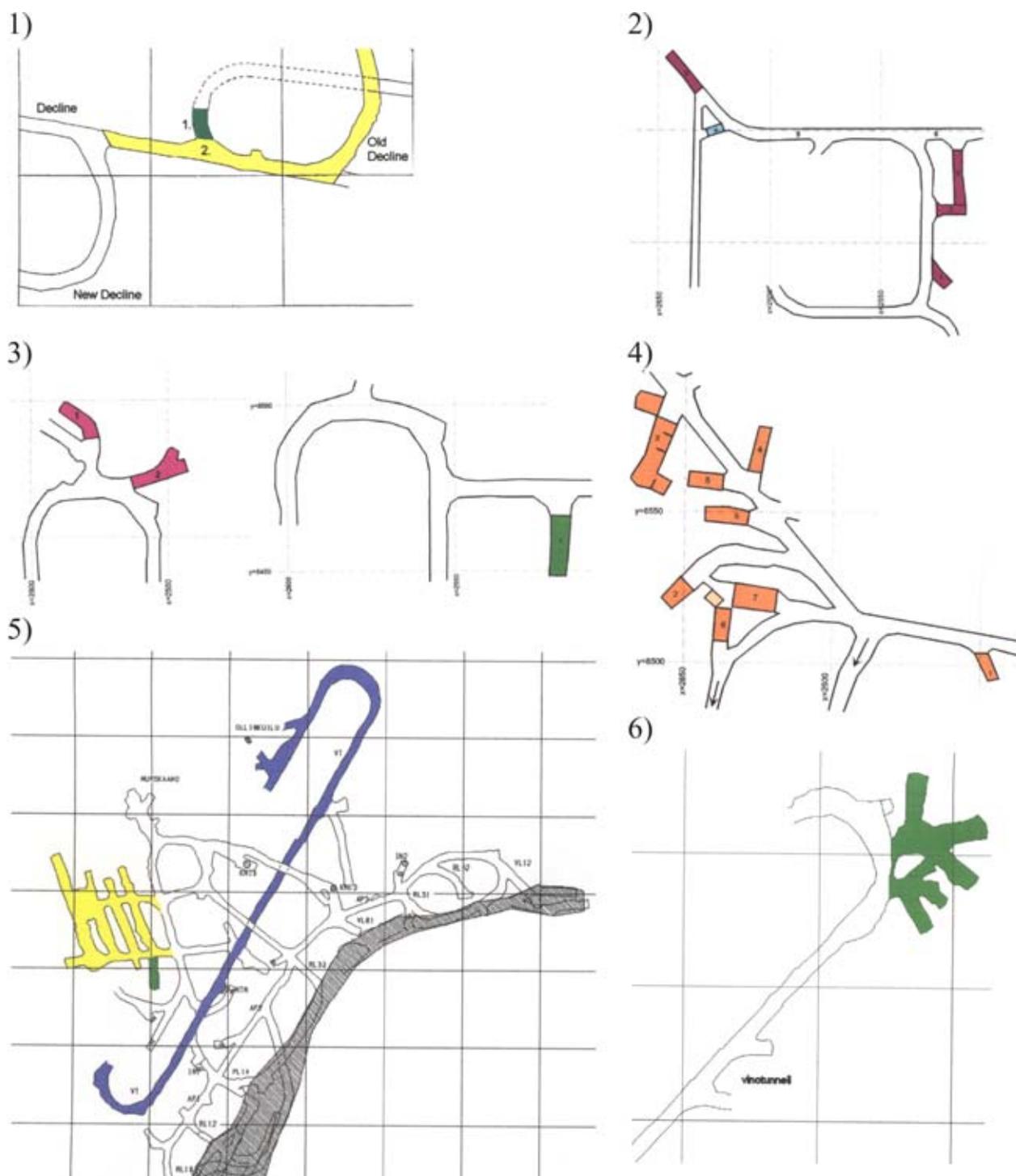


Рис. 4.53. Расположение научных комплексов различного назначения на действующих горизонтах шахты Пихасалми



Рис. 4.54. Промышленная площадка шахты Балби



Рис. 4.55. Главный зал подземной физической лаборатории шахты Балби

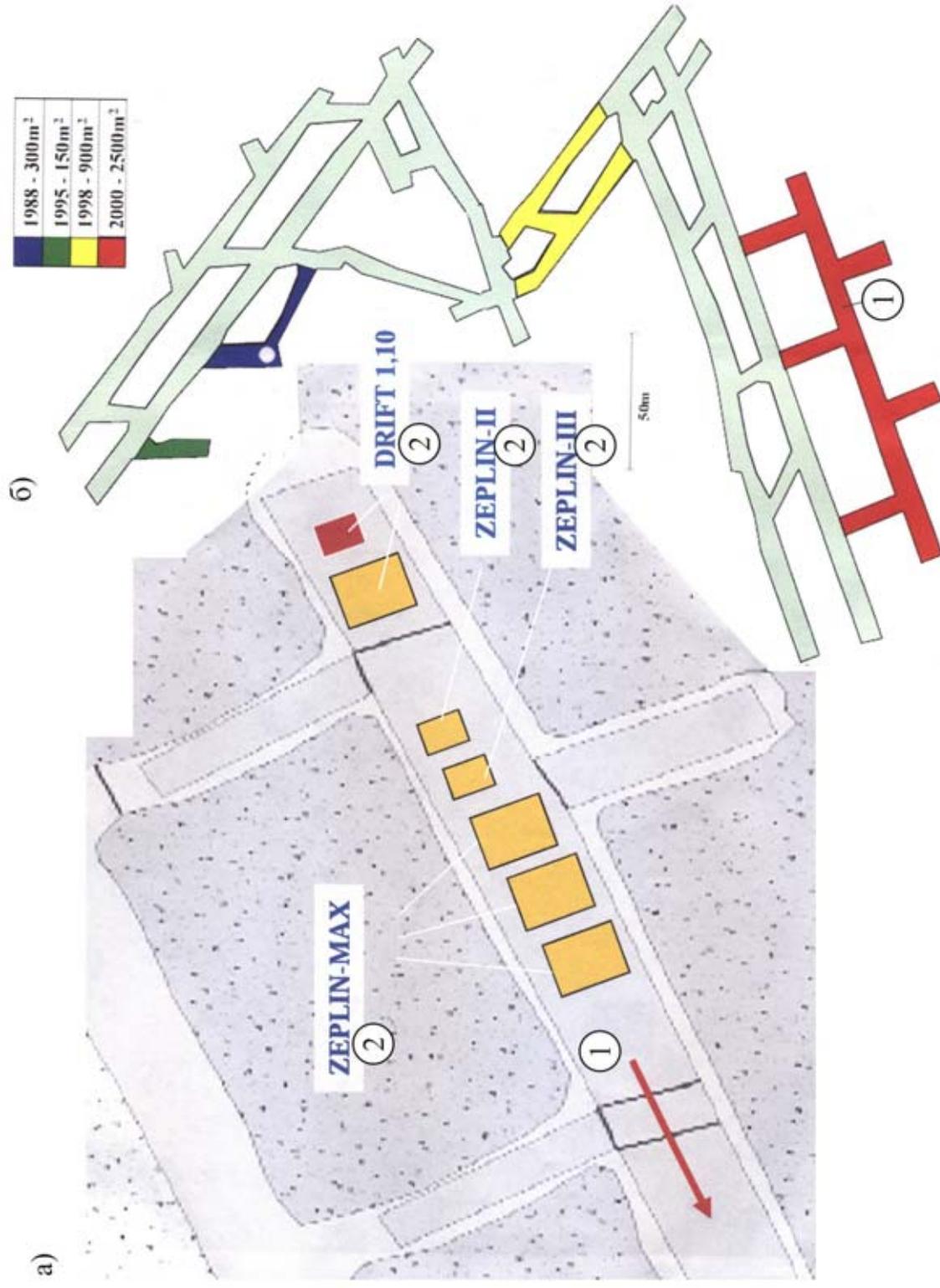


Рис. 4.56. Установка детекторов обнаружения «темной» материи в выработках шахты Балби

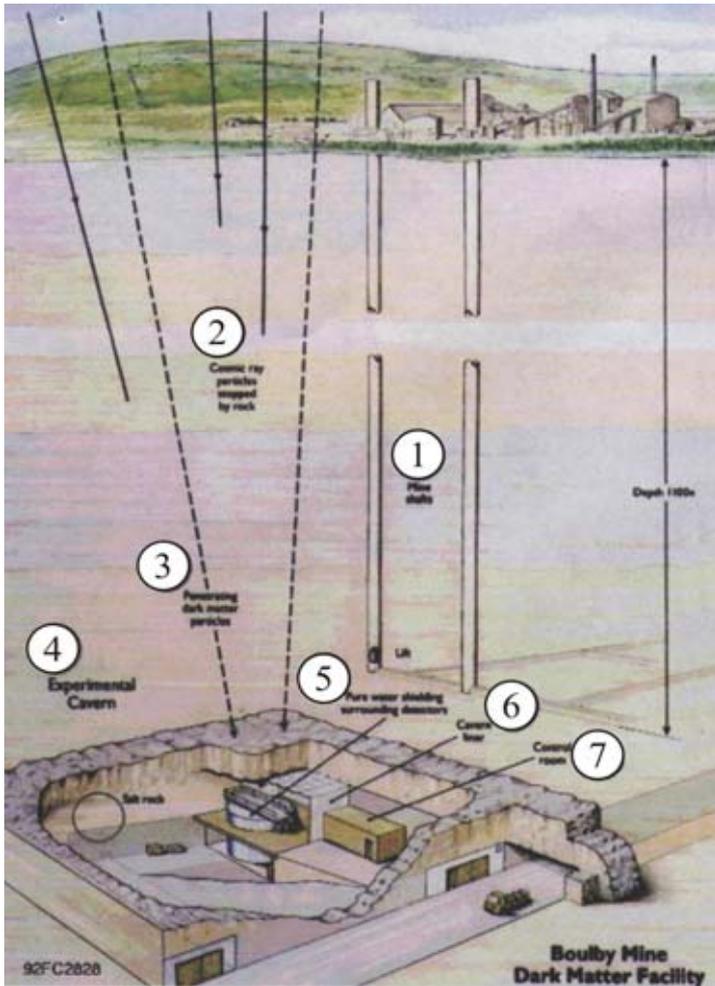
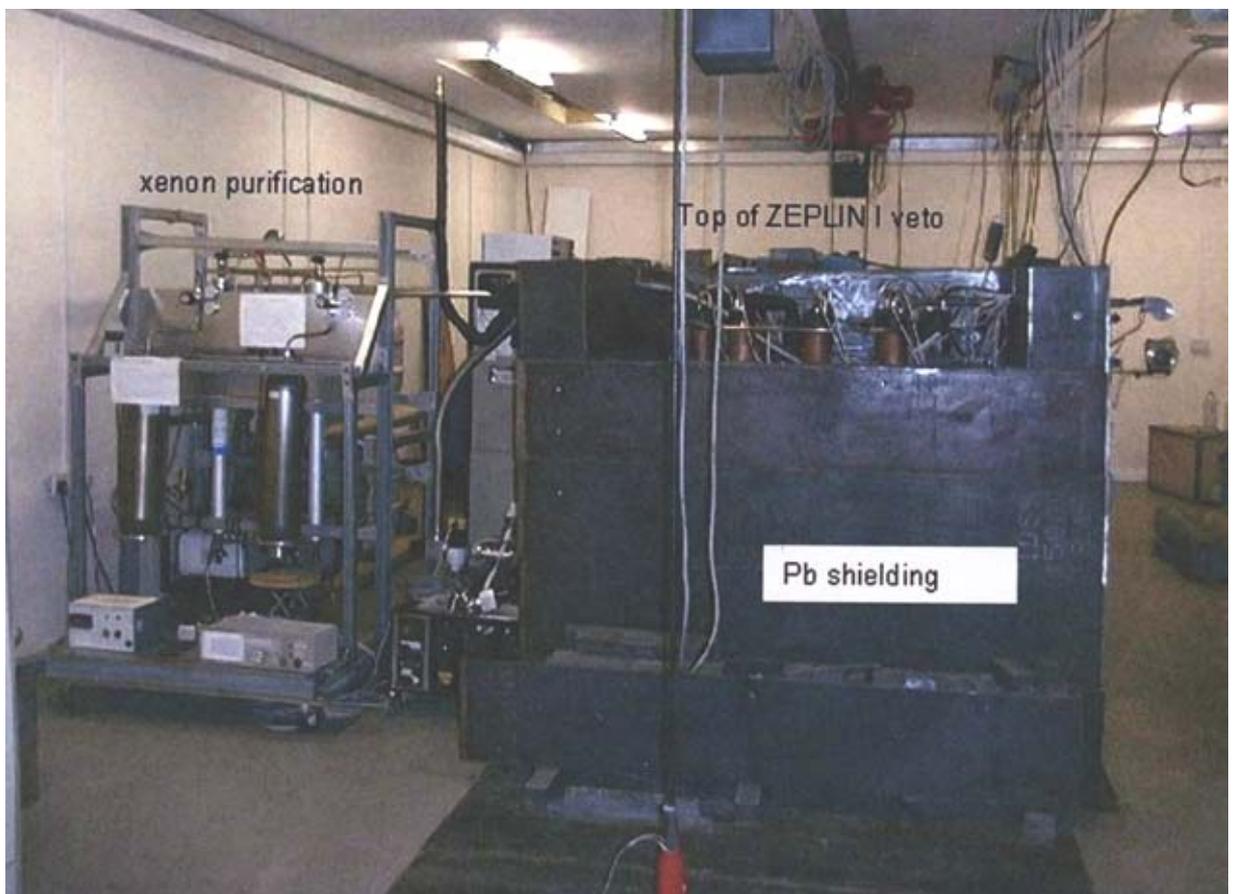


Рис. 4.57. Схема вскрывающих горных выработок шахты Балби и подземной физической лаборатории

Рис. 4.58. Установка детектора ZepLin в подземной лаборатории



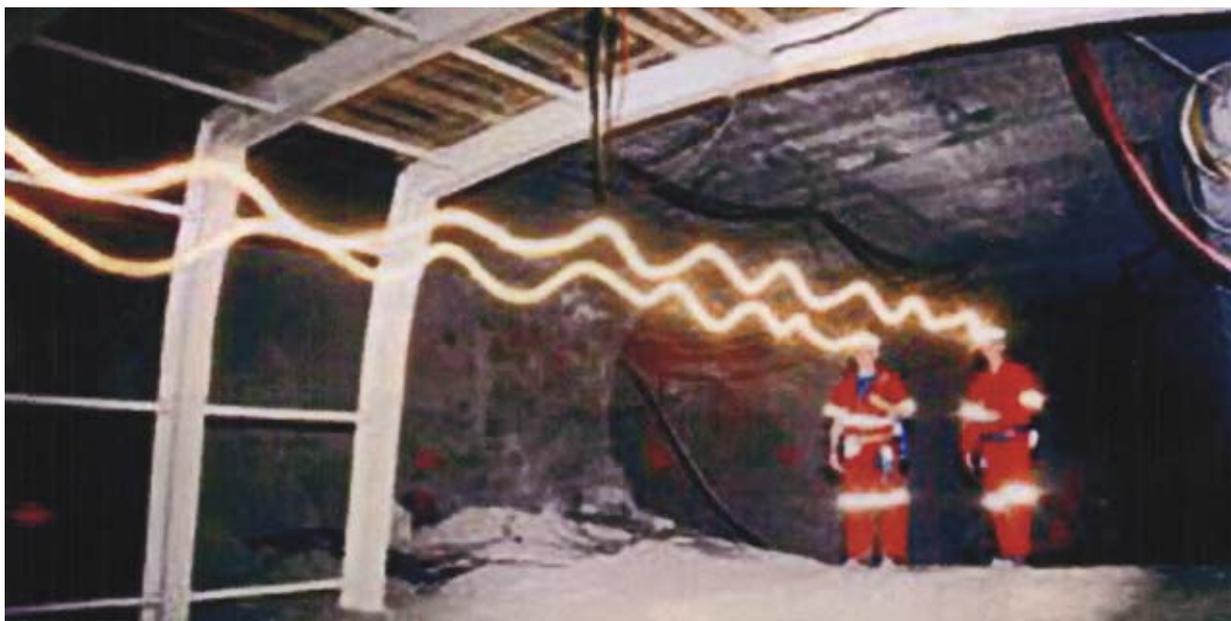


Рис. 4.59. Ученые в шахте Балби



Рис. 4.66. Промышленная площадка шахты Крайтон

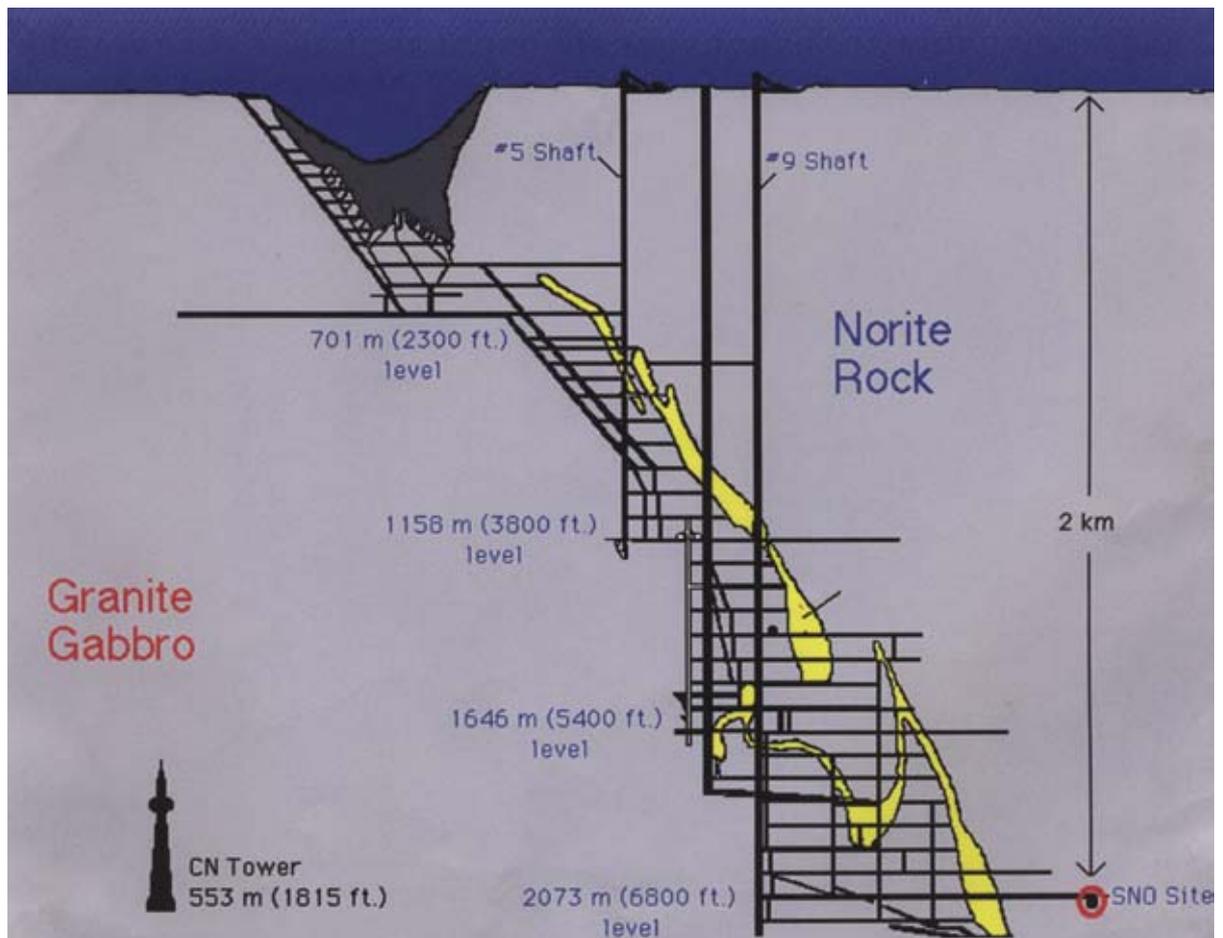


Рис. 4.67. Схема вскрытия шахты Крайтон

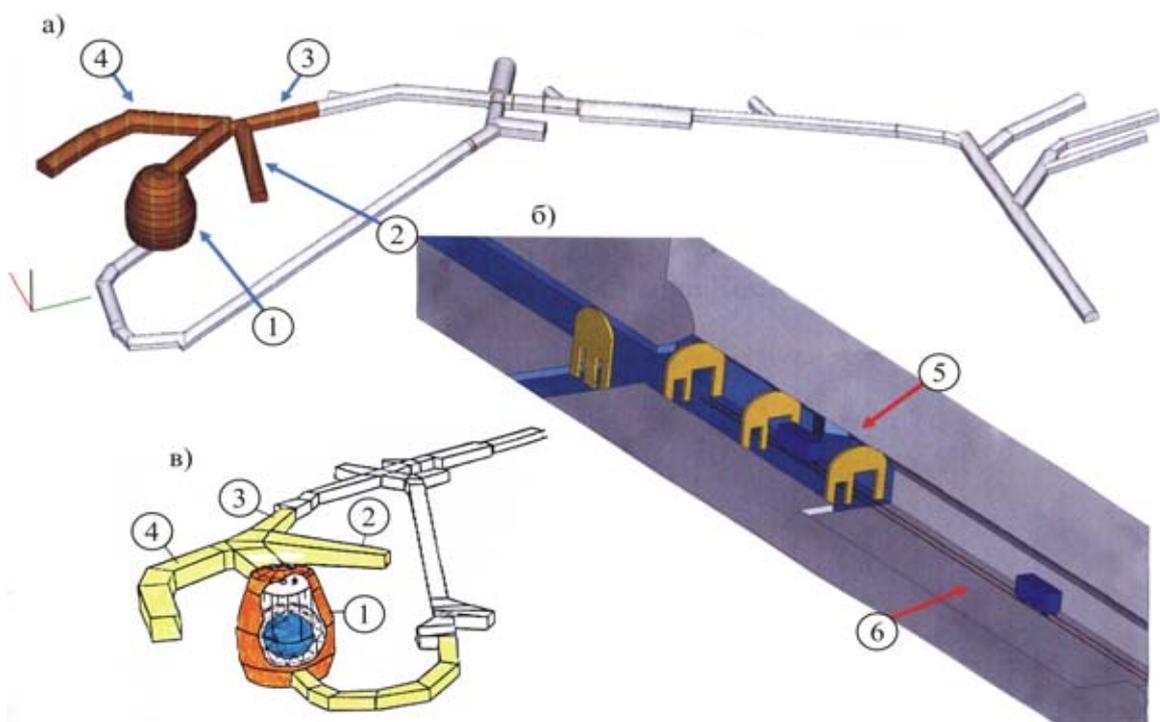


Рис. 4.69. Горные выработки лабораторного комплекса шахты Крайтон

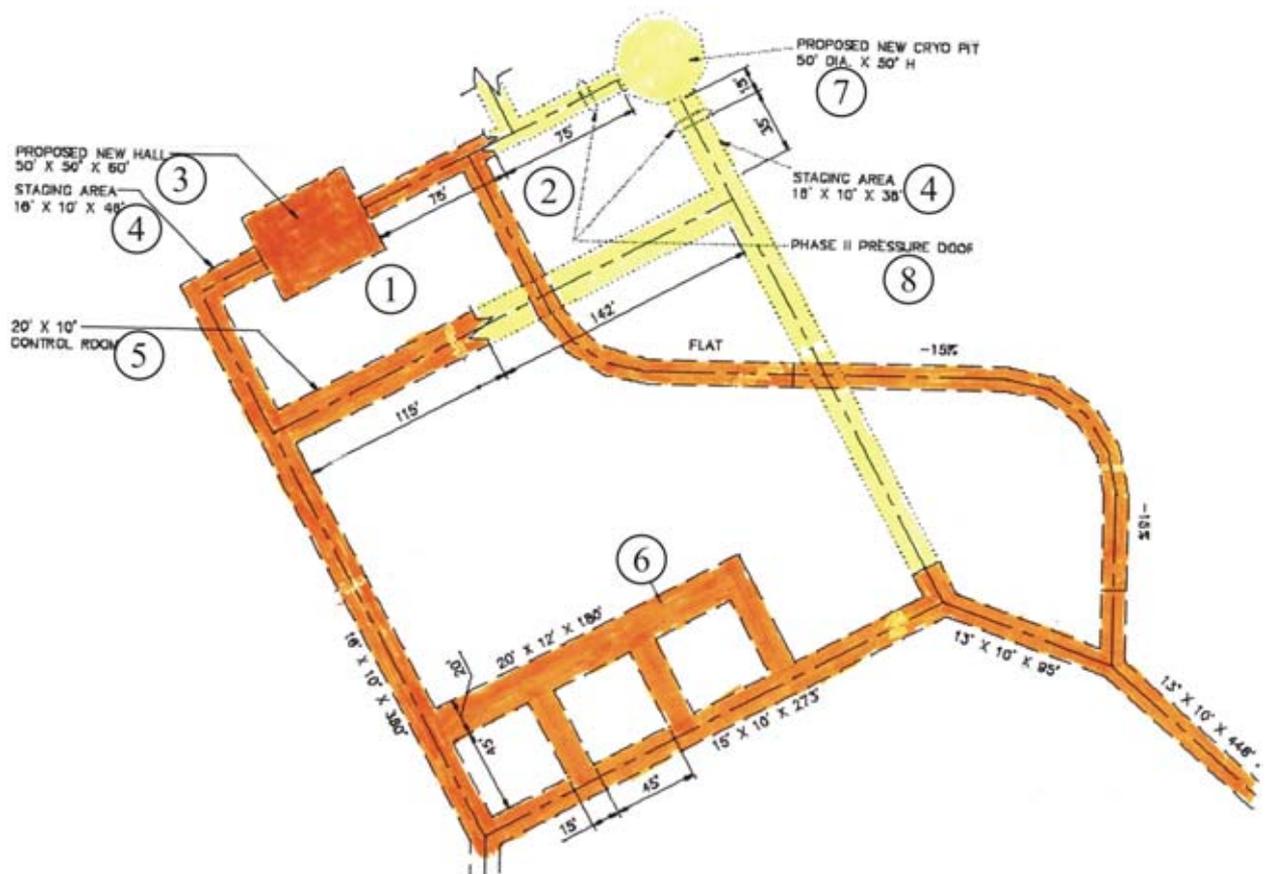


Рис. 4.71. Схема горных выработок и полостей перспективного лабораторного комплекса (размеры в футах, 1 фут = 0,3048 м) шахты Крайтон

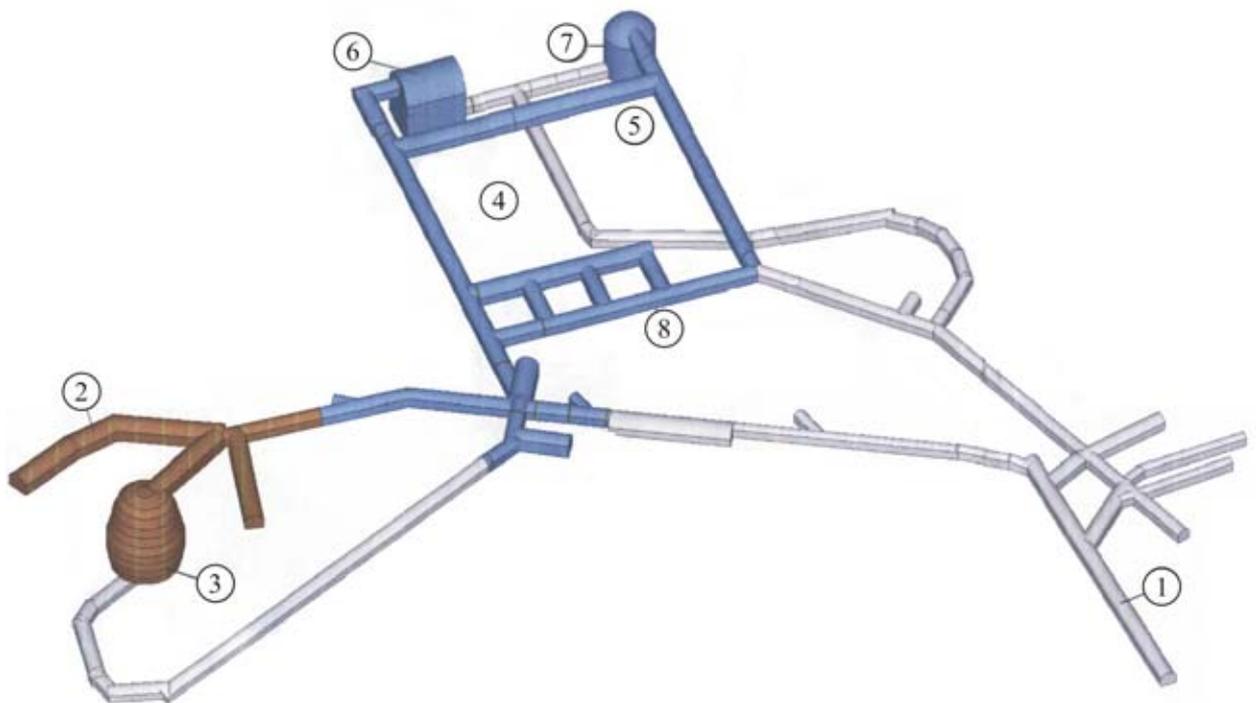


Рис. 4.72. Схема лабораторных комплексов (существующего и перспективного) шахты Крайтон

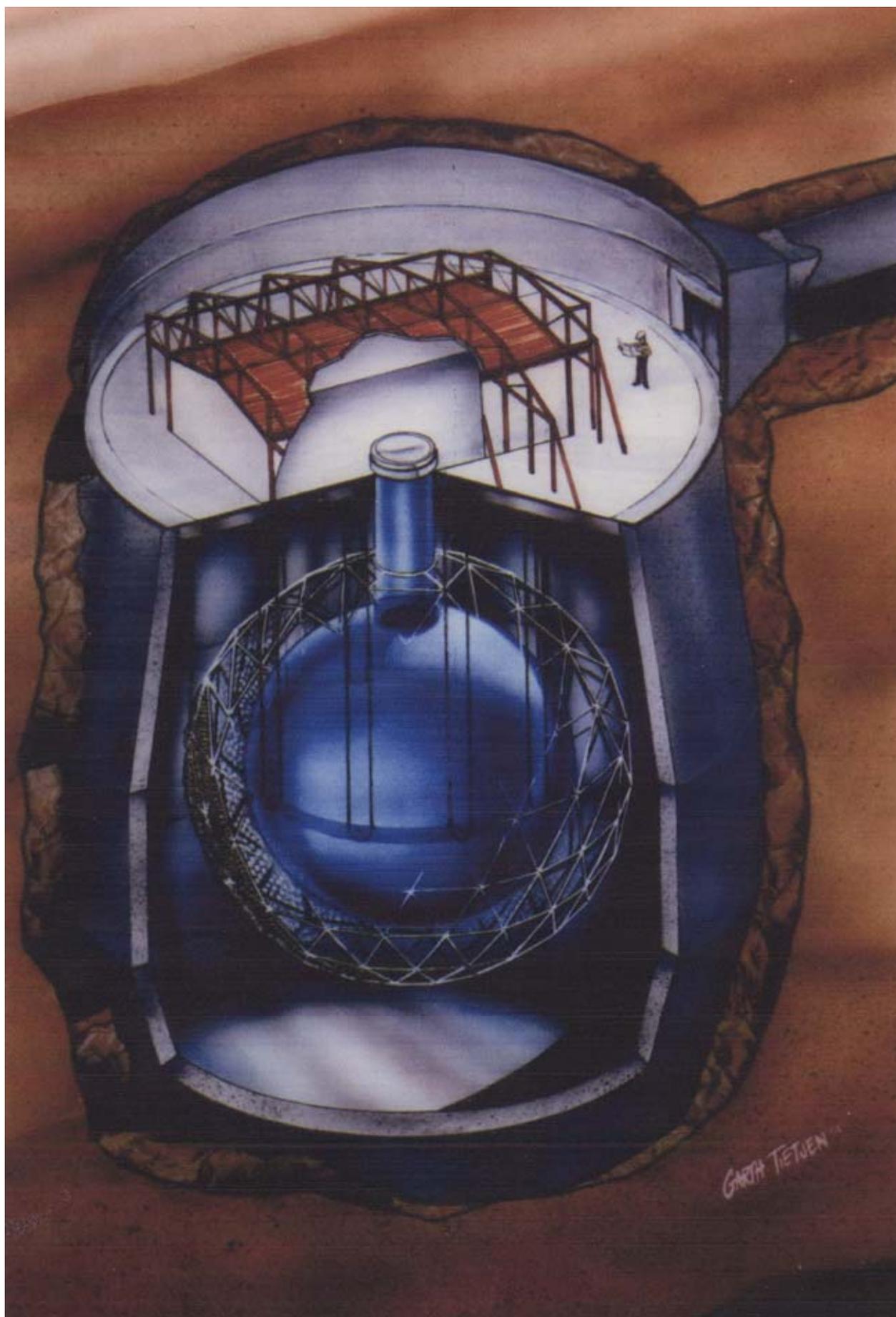


Рис. 4.73. Схема нейтринного детектора SNO лаборатории Садбэри

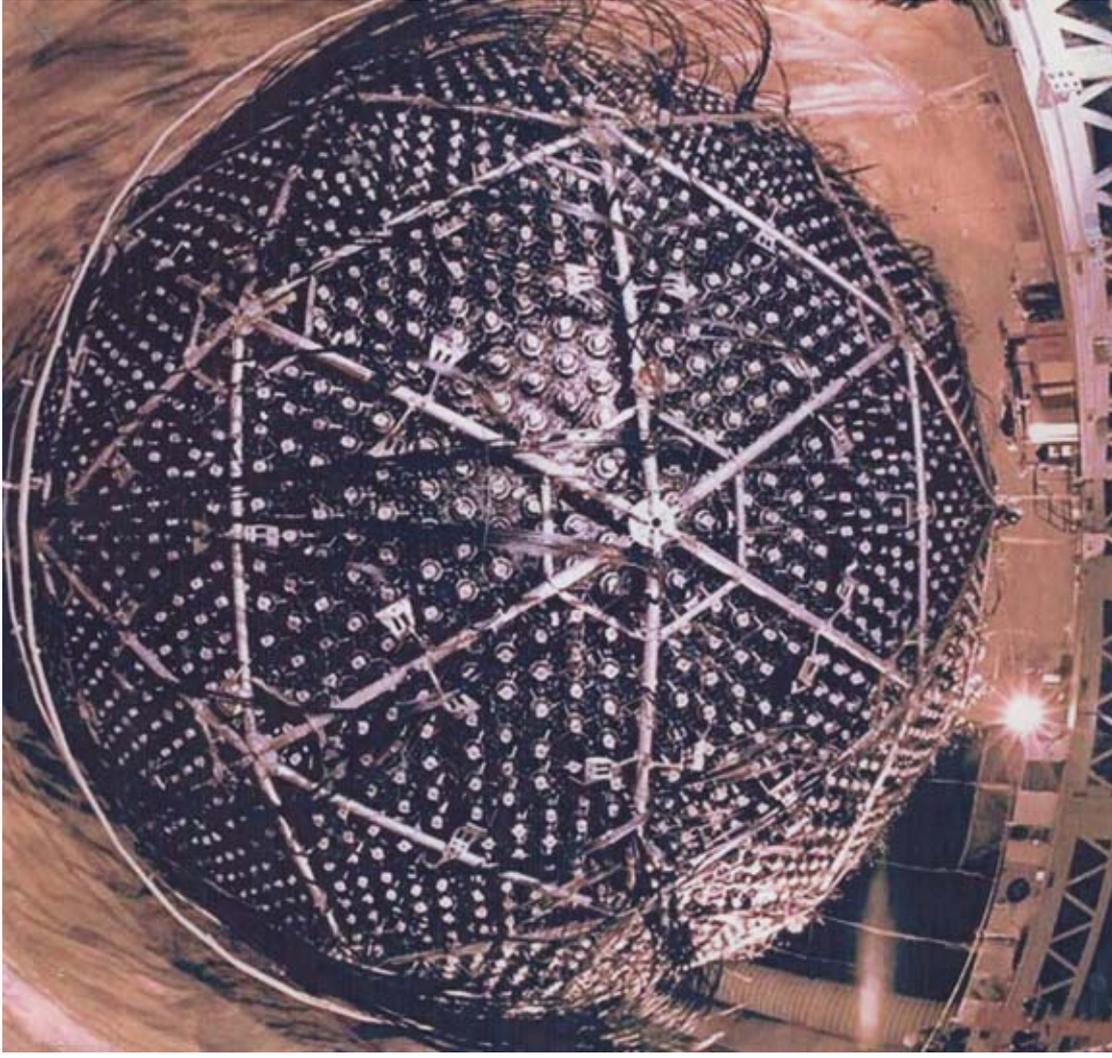


Рис. 4.74. Наружный вид детектора SNO

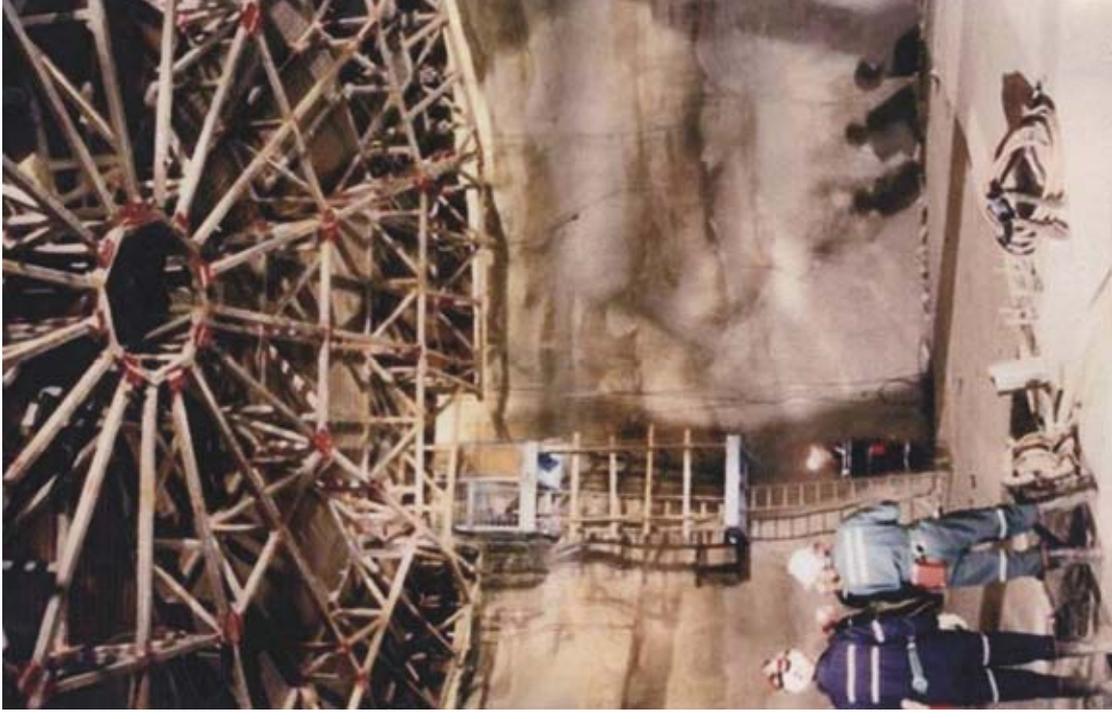


Рис. 4.75. Монтаж детектора SNO

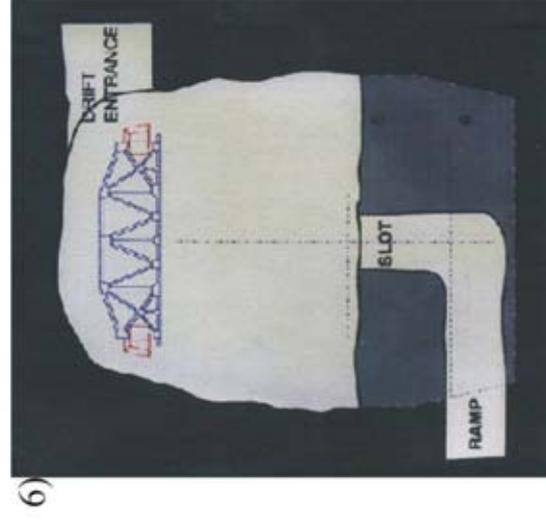
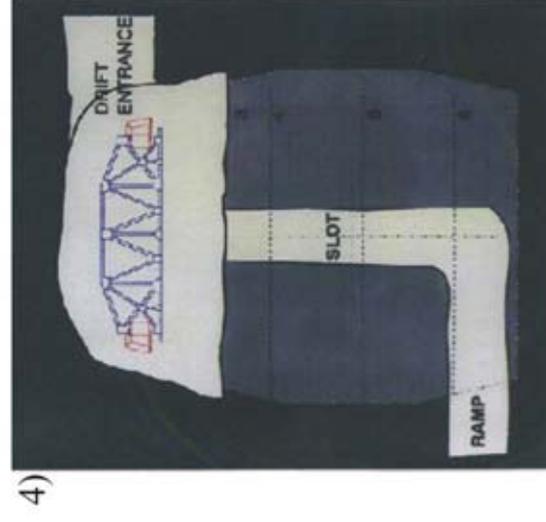
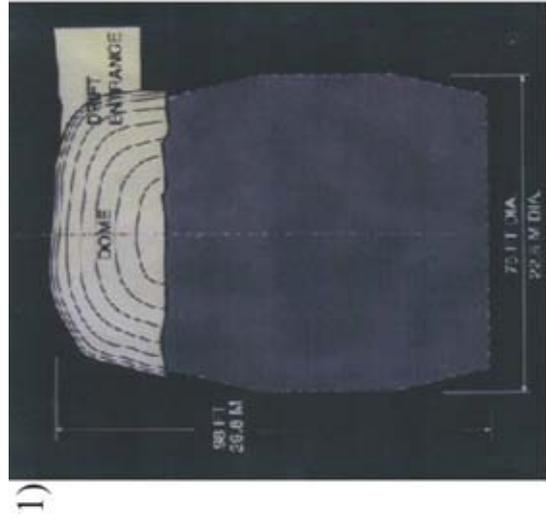


Рис. 4.76. Стадии проходческих работ по сооружению камеры детектора SNO

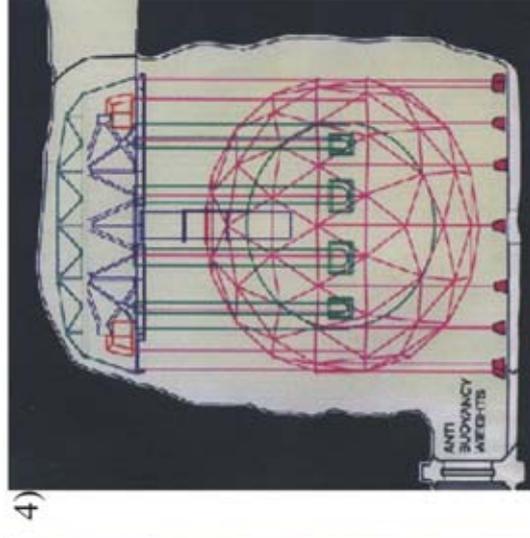
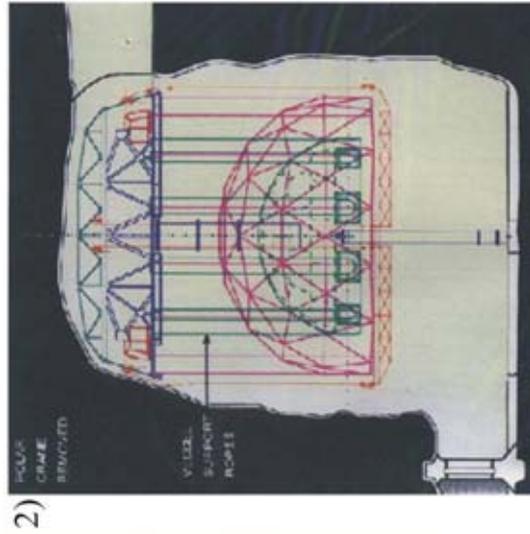
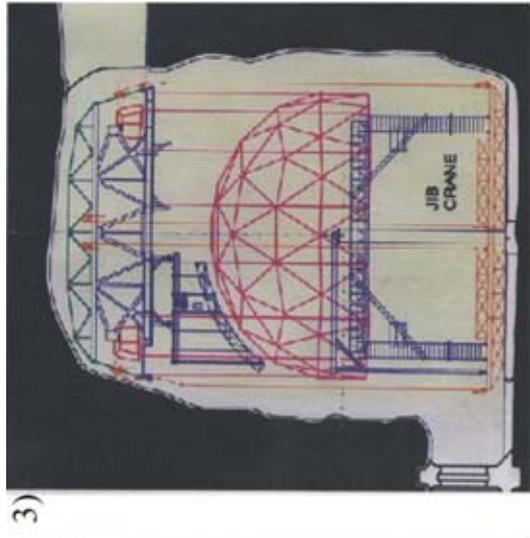
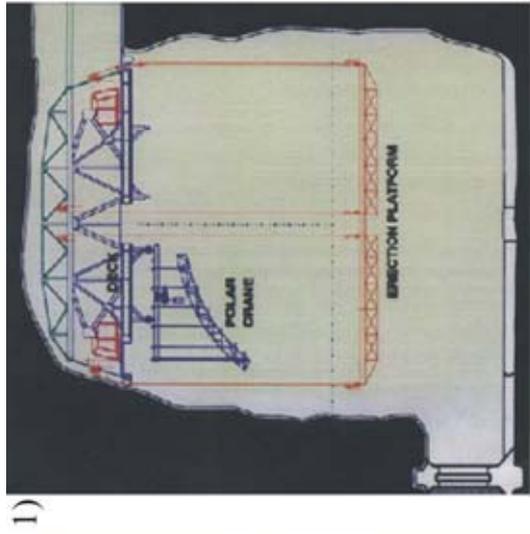
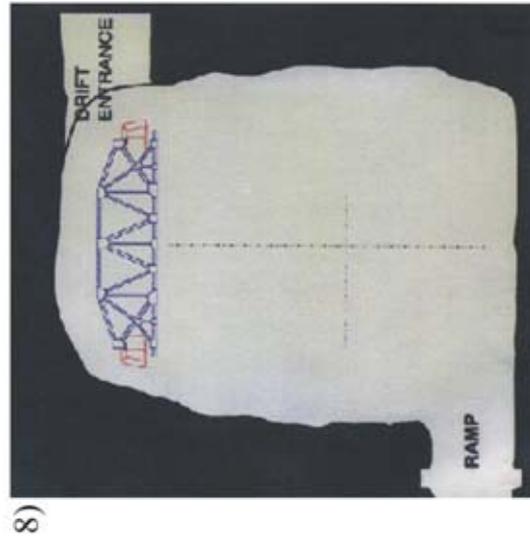


Рис. 4.76. (продолжение)

Рис. 4.77. Стадии монтажа детектора: сферической оболочки (красный цвет) и акрилового сосуда (зеленый цвет)



Рис .4.78. Проходка камеры детектора

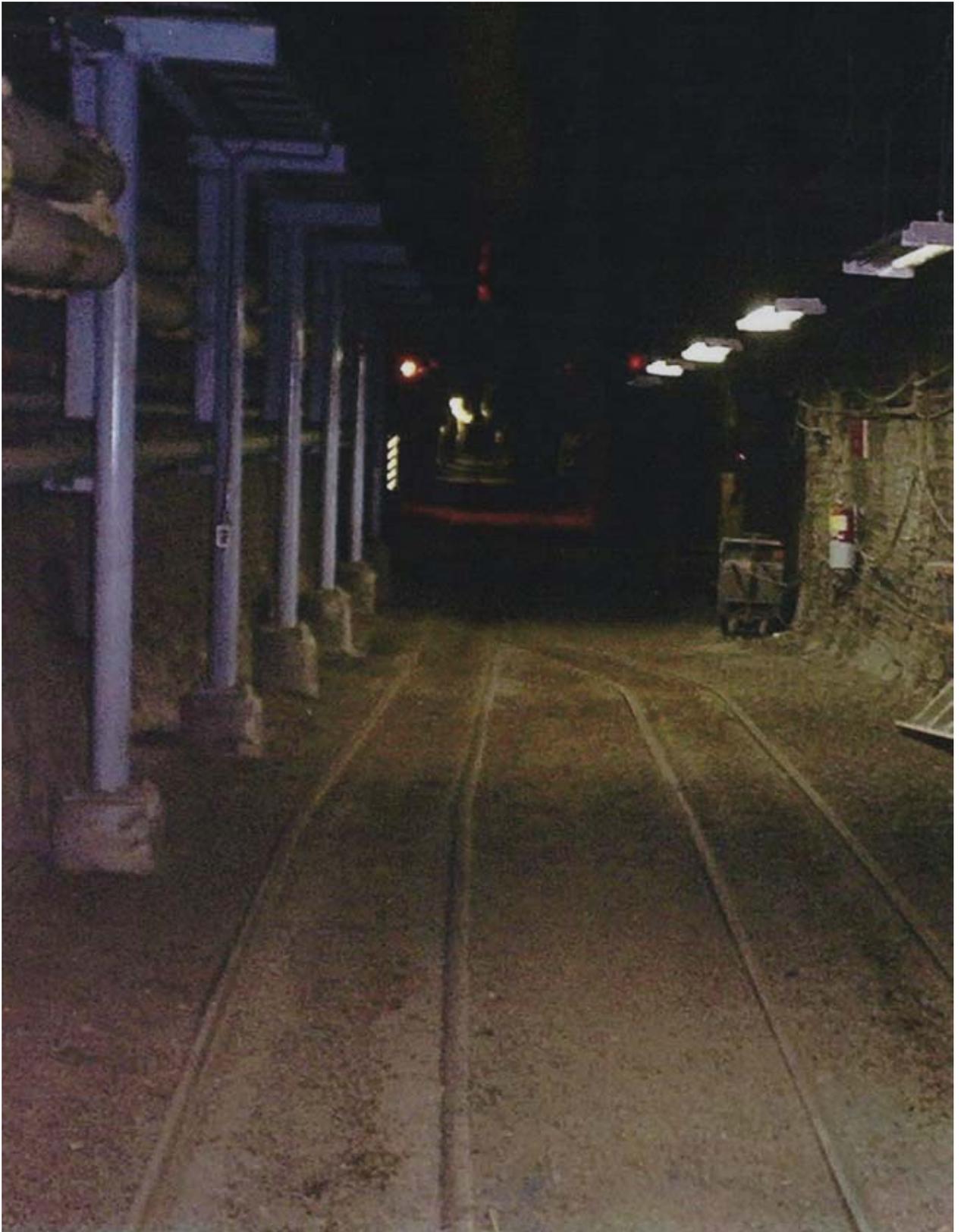
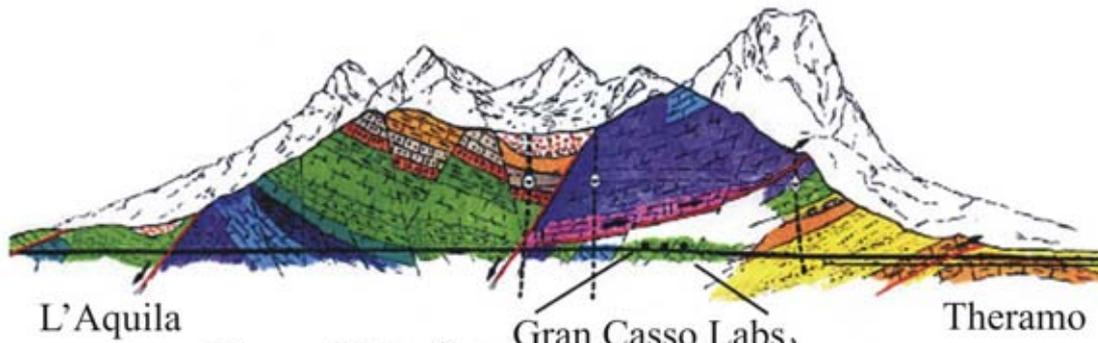


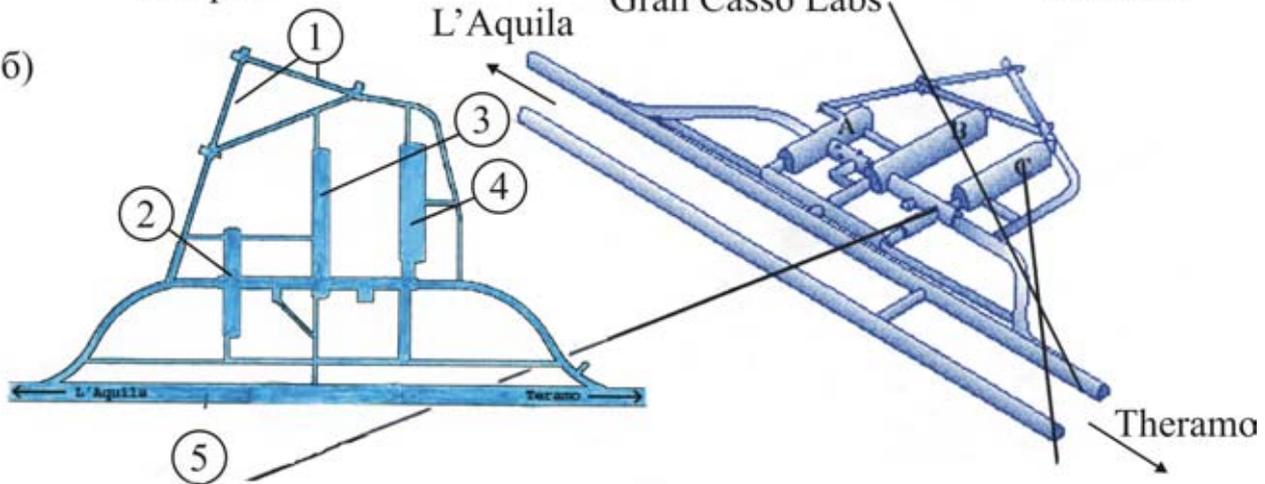
Рис. 4.79. Вспомогательный туннель

a)

The Gran Casso Laboratory



b)



B)

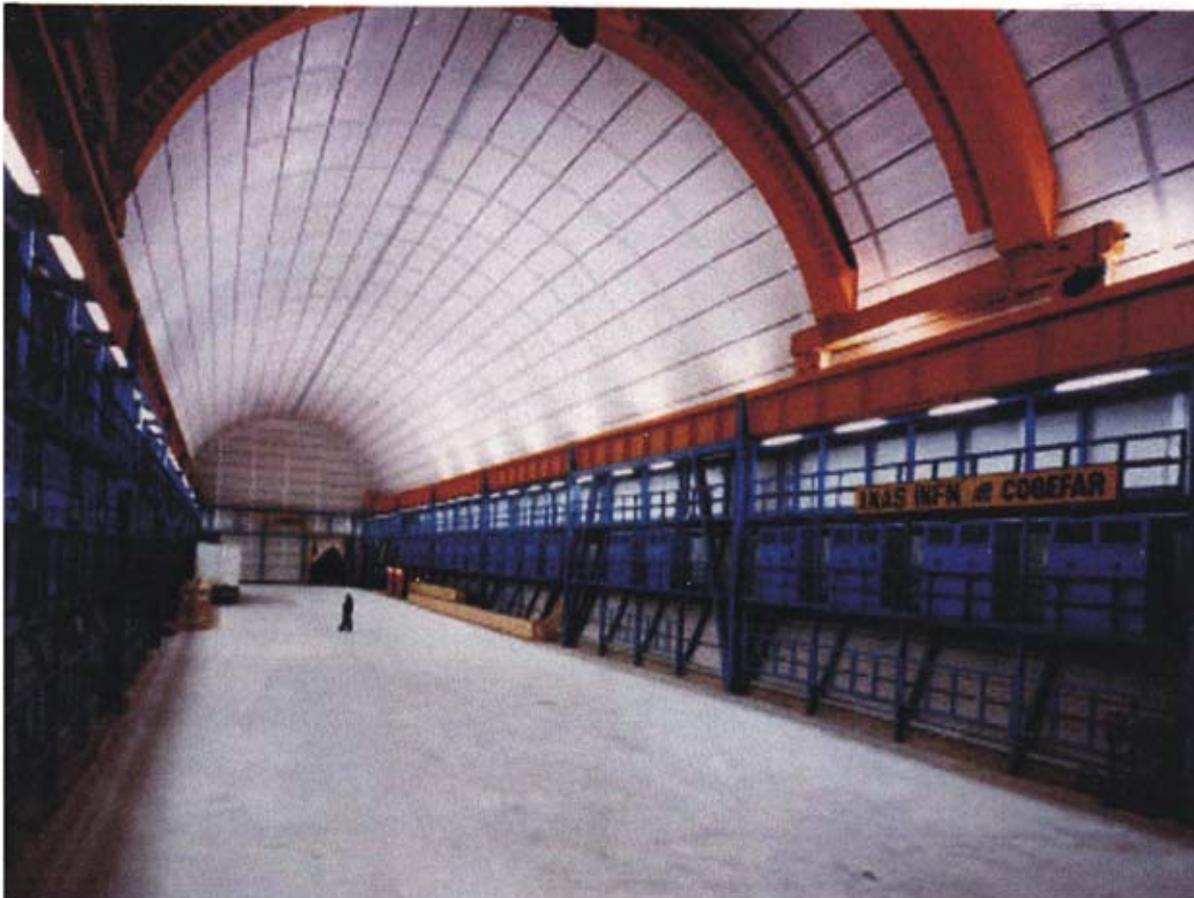
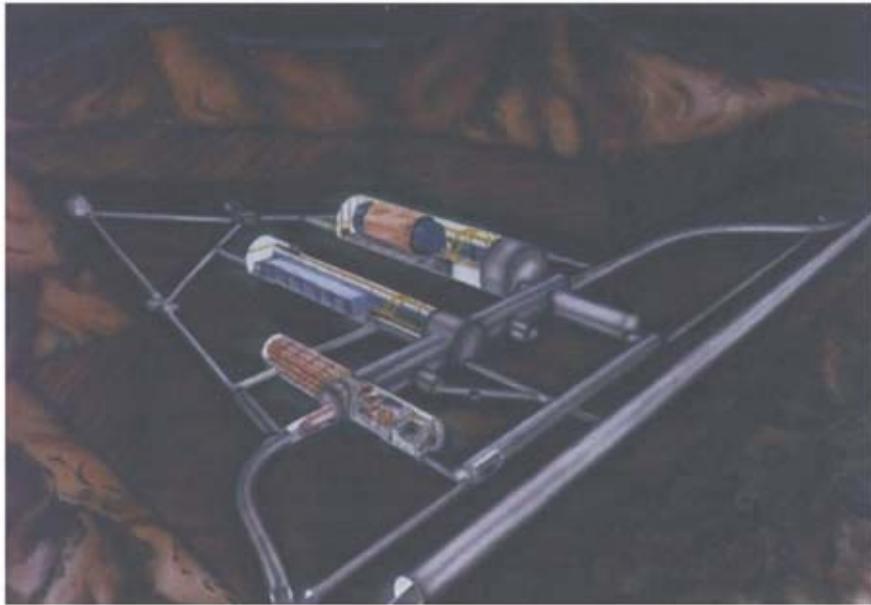


Рис. 4.80. Расположение и состав лаборатории Грэн Сэссо

a)



б)

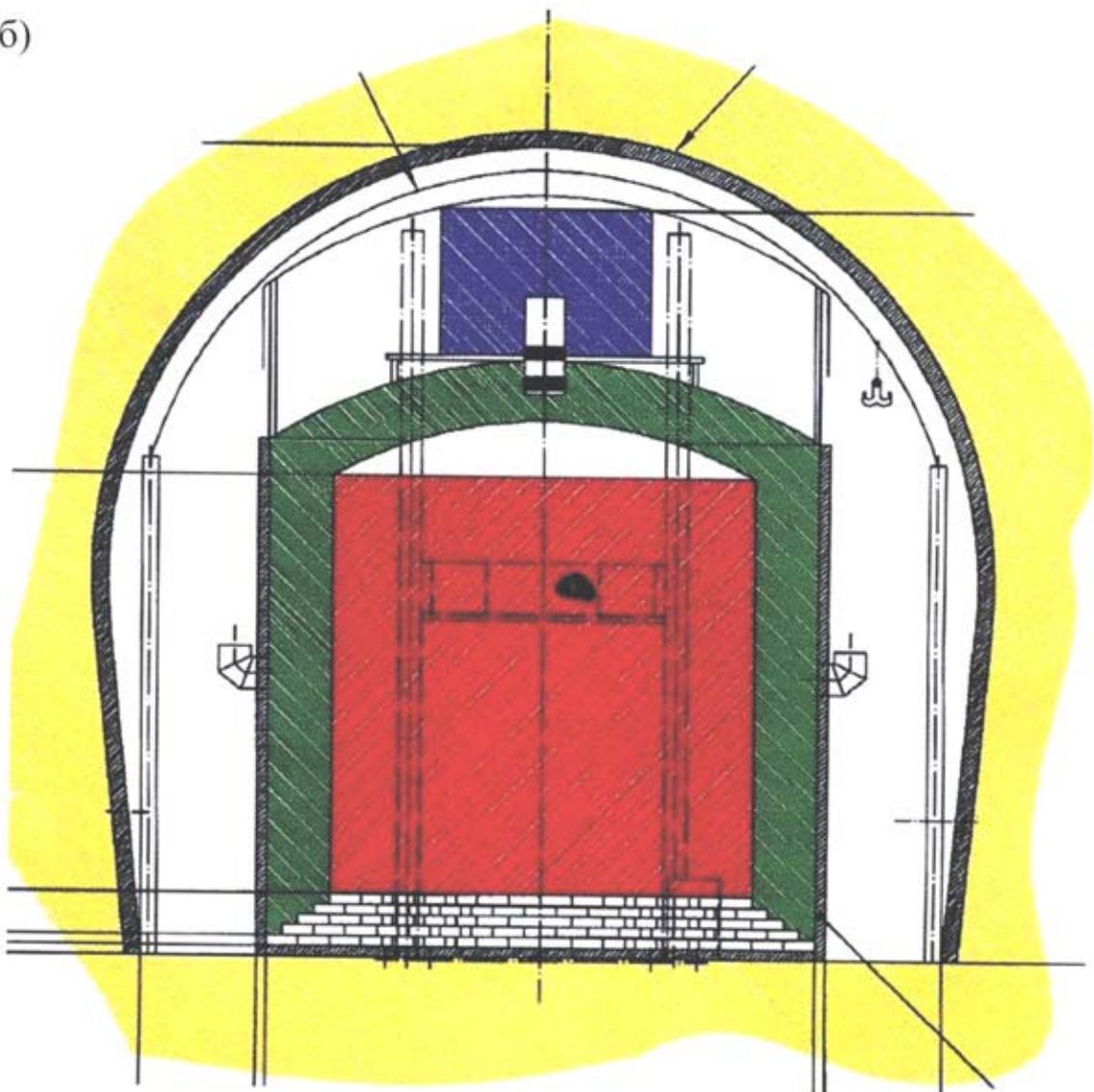


Рис. 4.81. Схемы расположения оборудования в лабораторных залах

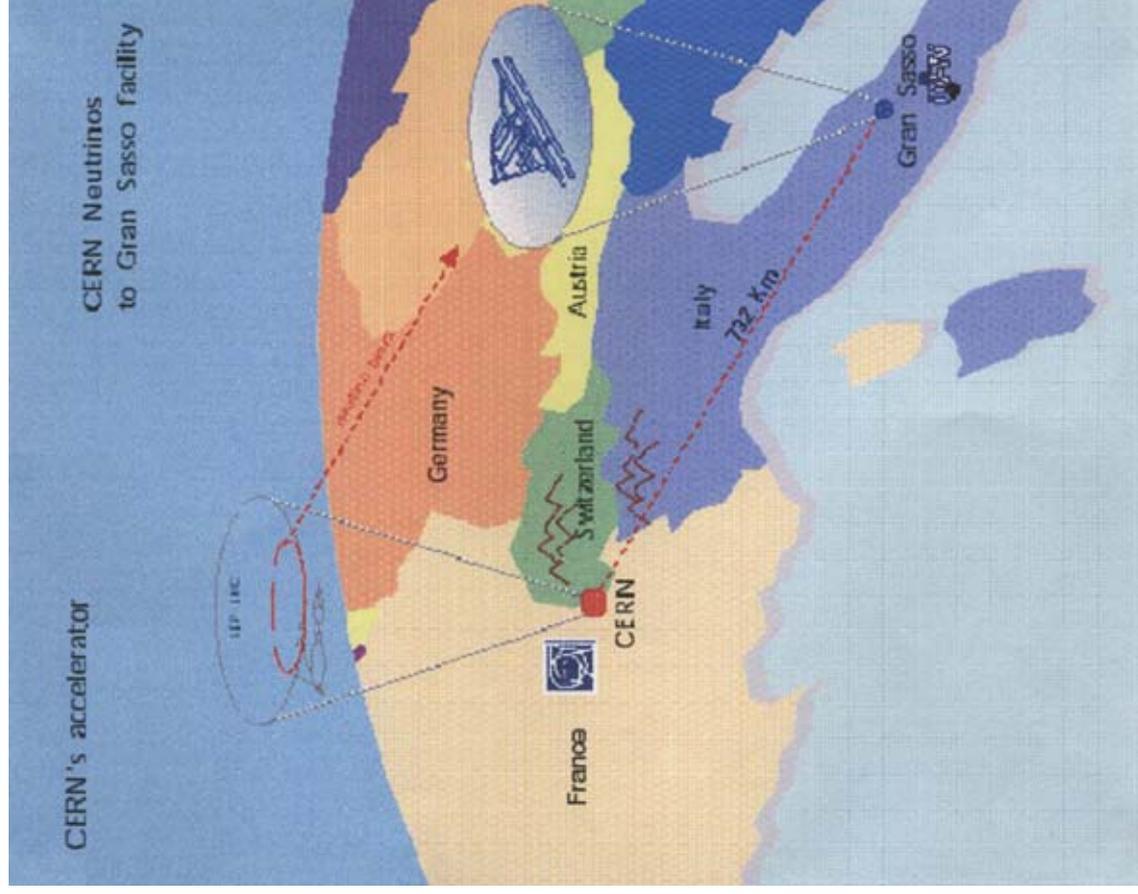


Рис. 4.82. Схема совместных экспериментов ускорителя CERN и лаборатории Грэн Сэссо



Рис. 4.83. Интерьер зала А лаборатории Грэн Сэссо

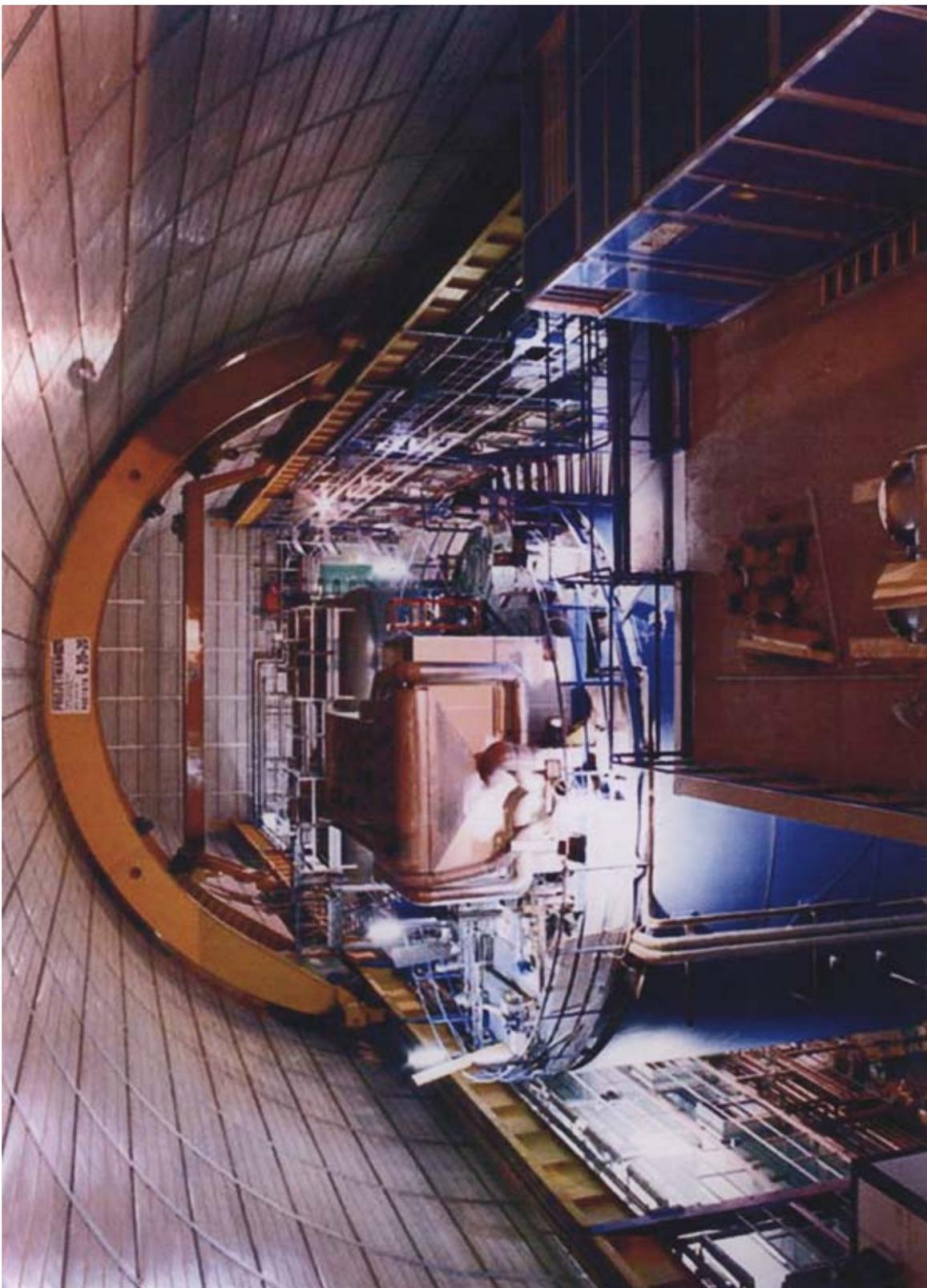
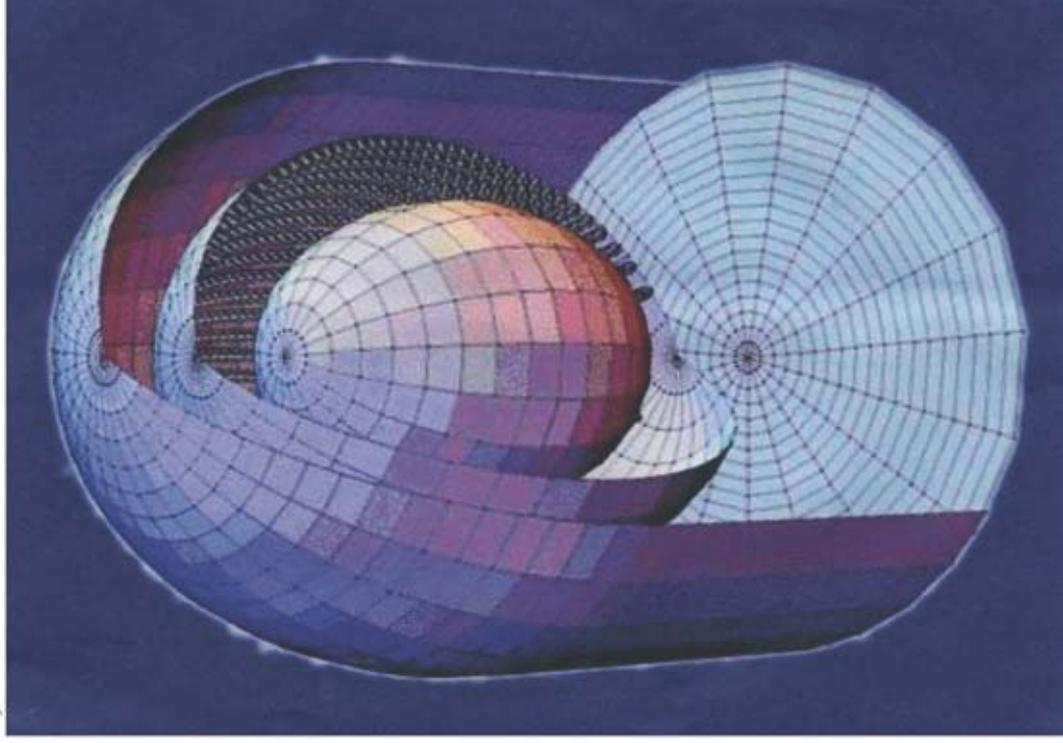


Рис. 4.85. Интерьер зала С. Монтажные работы

б)



а)

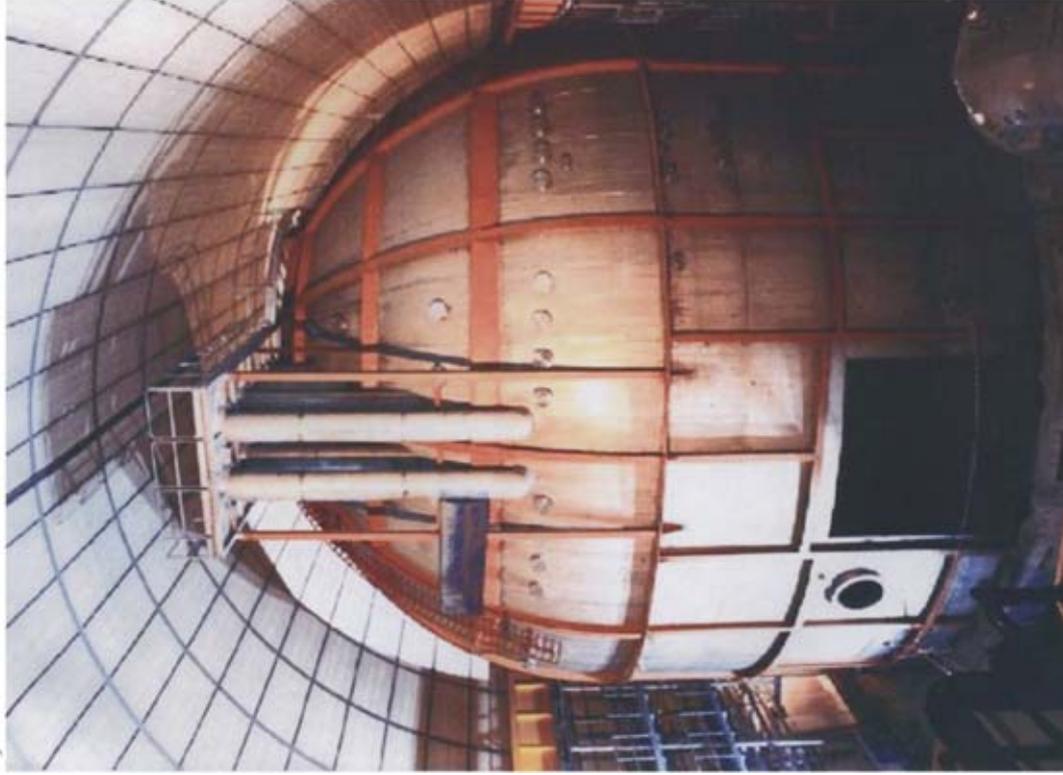


Рис. 4.86. Общий вид детектора Боркесино лаборатории Грэн Сэссо



Рис. 4.87. Сооружение лабораторной полости (лаборатория Грэн Сэссо)



**Рис. 4.88. Проходка полости буровзрывным способом
(лаборатория Грэн Сэссо)**



**Рис. 4.89. Проходка полости комбайном (лаборатория Грэн
Сэссо)**

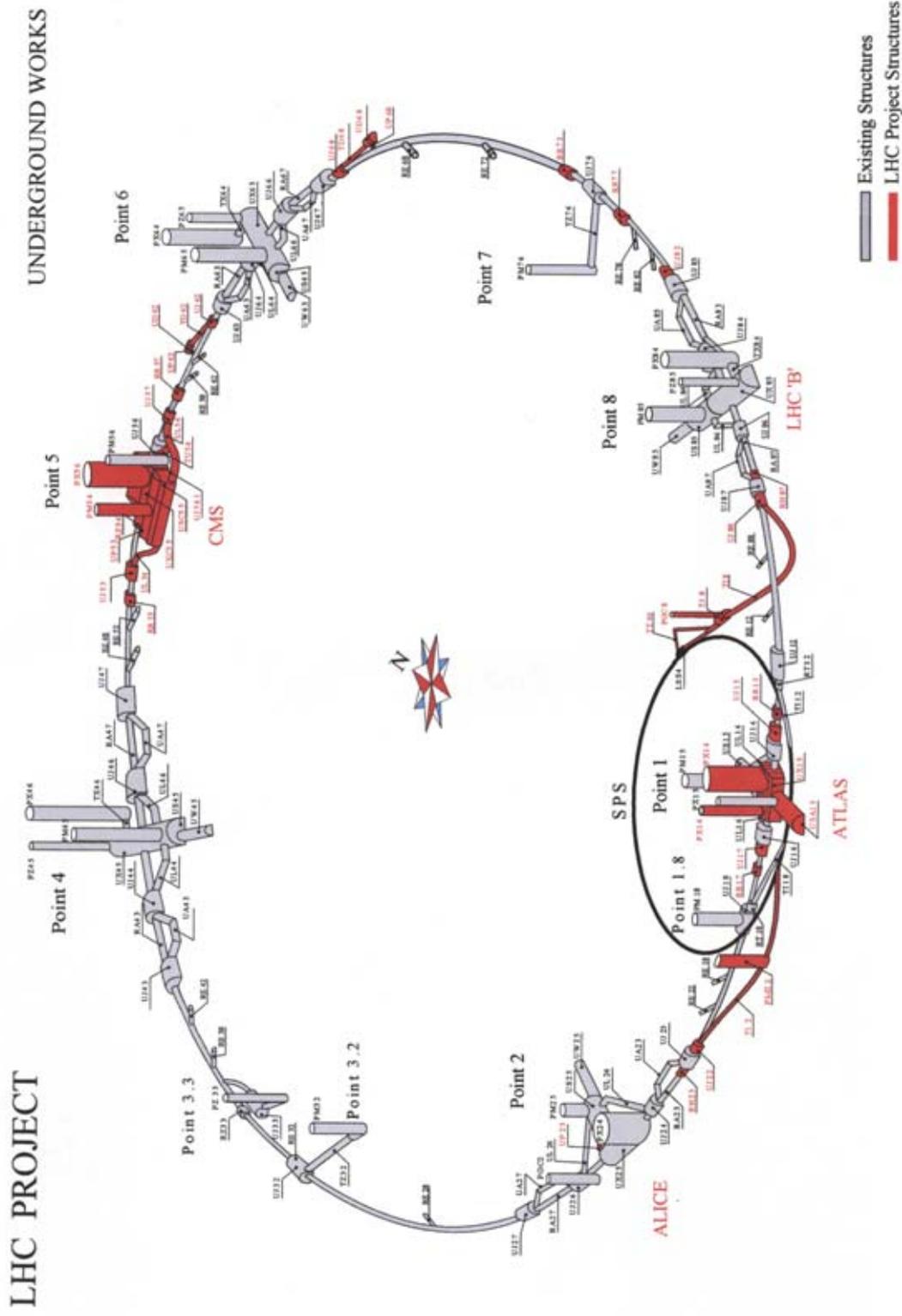


Рис. 4.90. Общая схема ускорителя LEP/LHC (подземные работы)

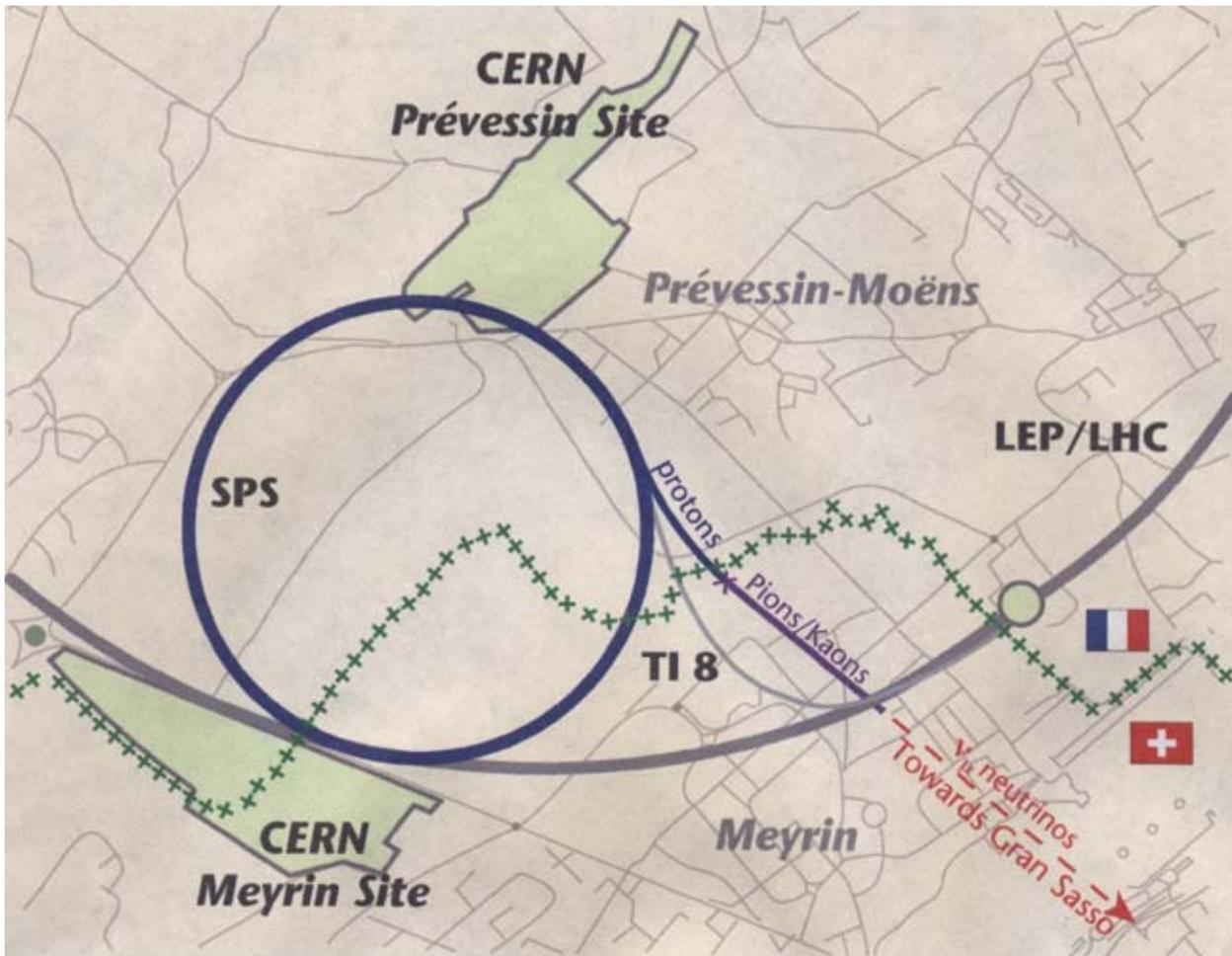


Рис. 4.91. Схема кольца синхротрона SPS



Рис. 4.92. Панорама расположения комплекса ускорителя LEP/LHC

a)

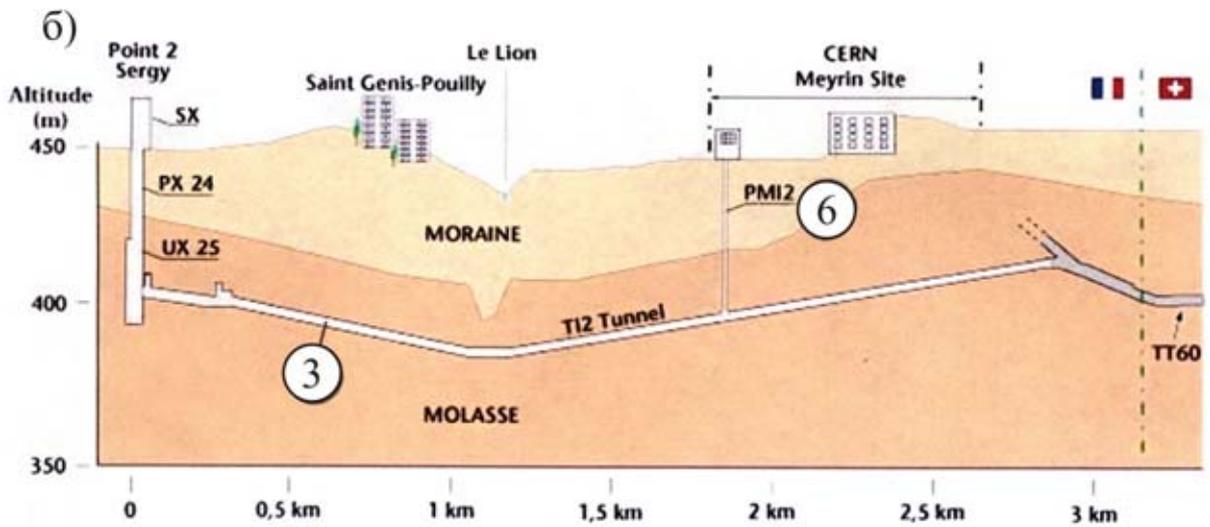
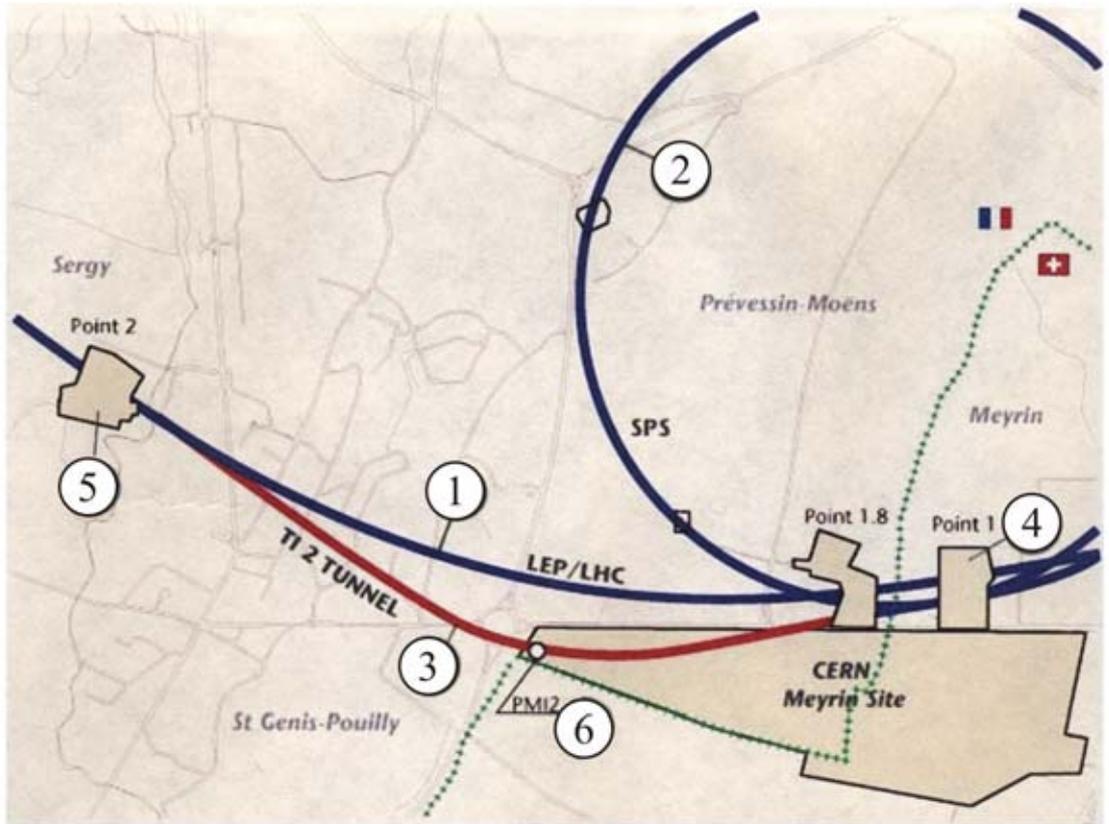
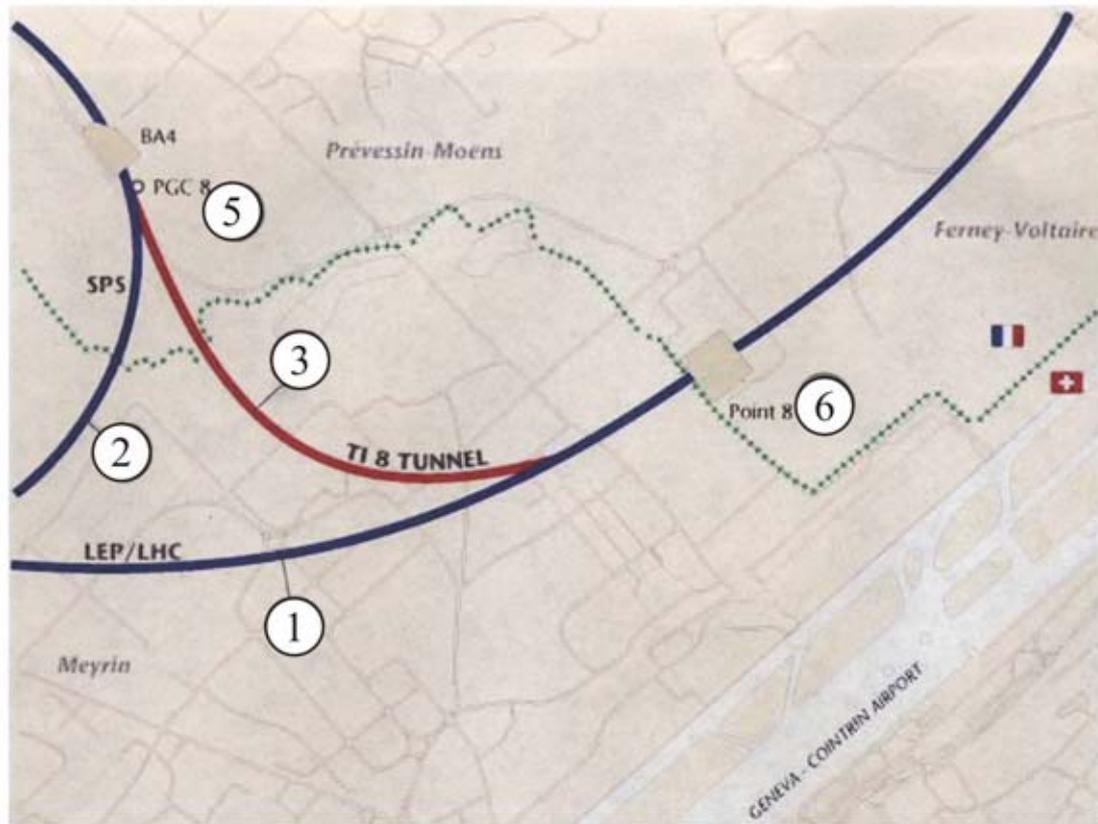


Рис. 4.97. Схемы туннелей T12 и T18 при реконструкции комплекса ускорителя LEP/LHC

B)



Г)

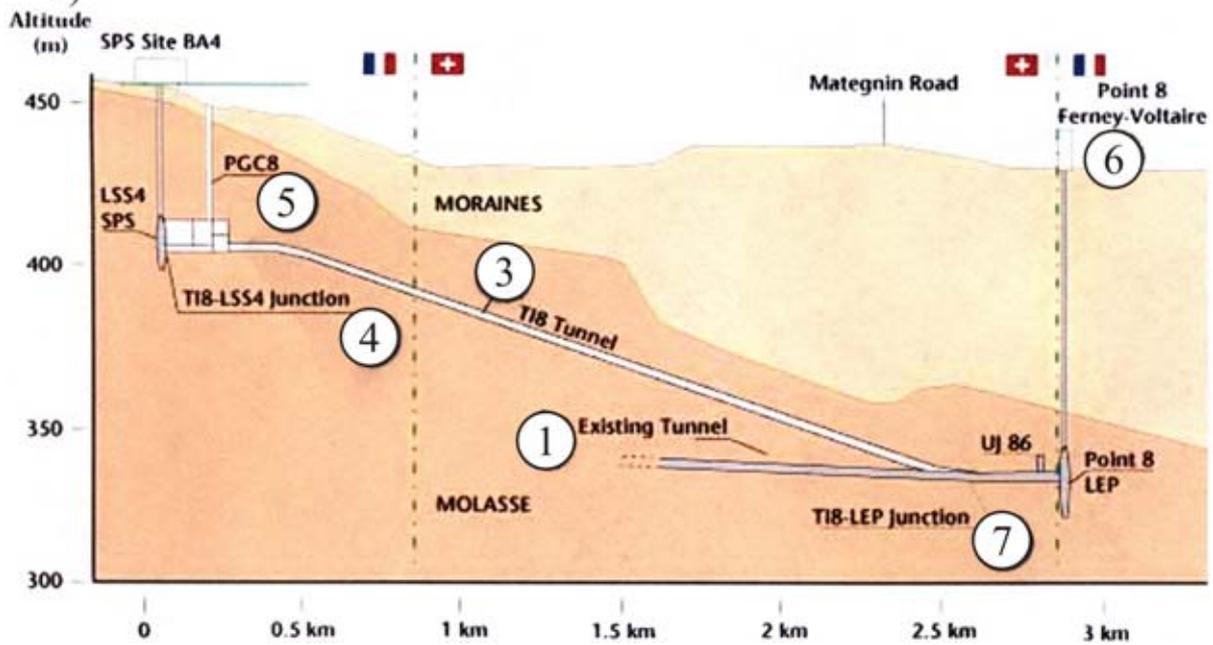


Рис. 4.97. (продолжение)



**Рис. 4.98. Монтаж оборудования в полости ускорителя
LEP/LHC**



**Рис. 4.99. Участок туннеля ускорителя со смонтированным
оборудованием**



Рис. 4.100. Вид с поверхности на устье вертикальной шахты

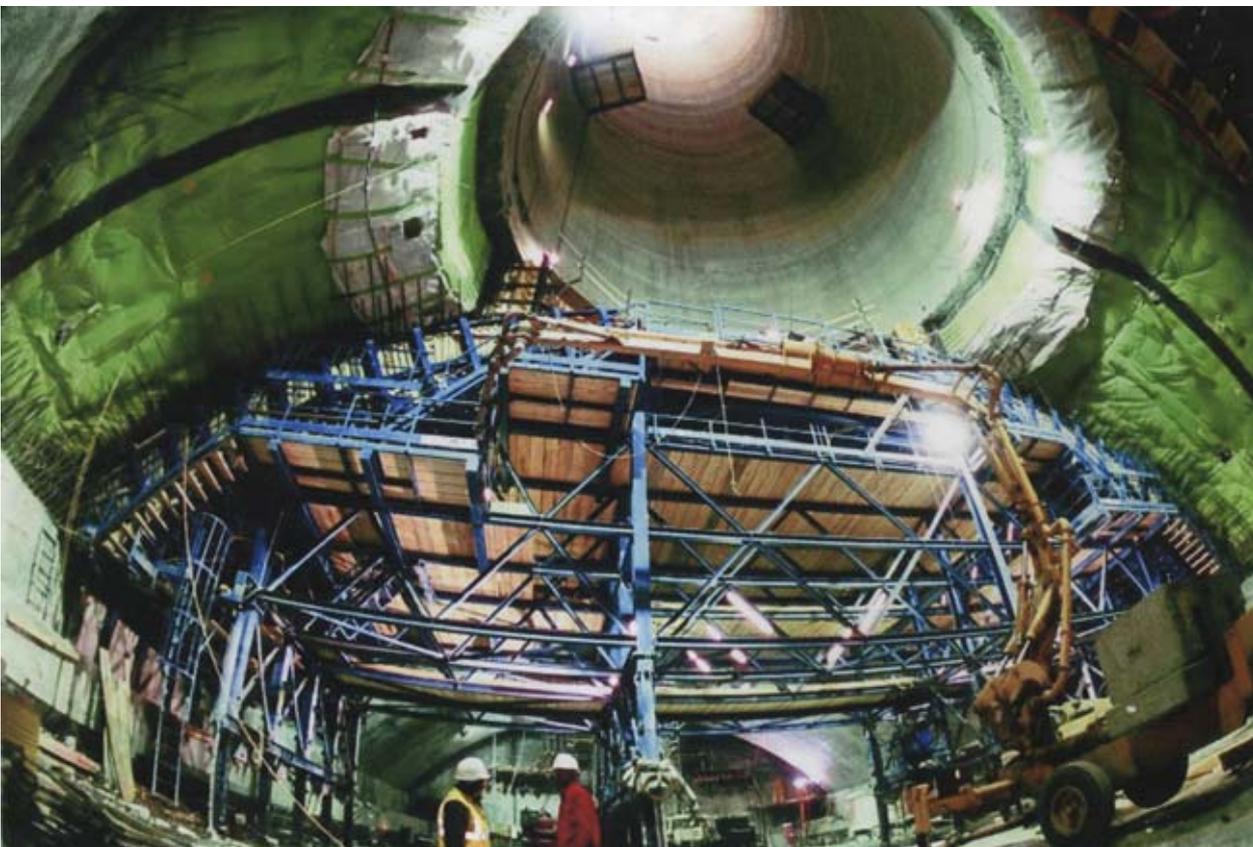


Рис. 4.101 Сооружение сопряжения вертикальной шахты с экспериментальной полостью



Рис. 4.102. Сооружение сопряжения вертикальной шахты с экспериментальной полостью



Рис. 4.103. Установка анкерной крепи в сопряжении вертикальной шахты с экспериментальной полостью

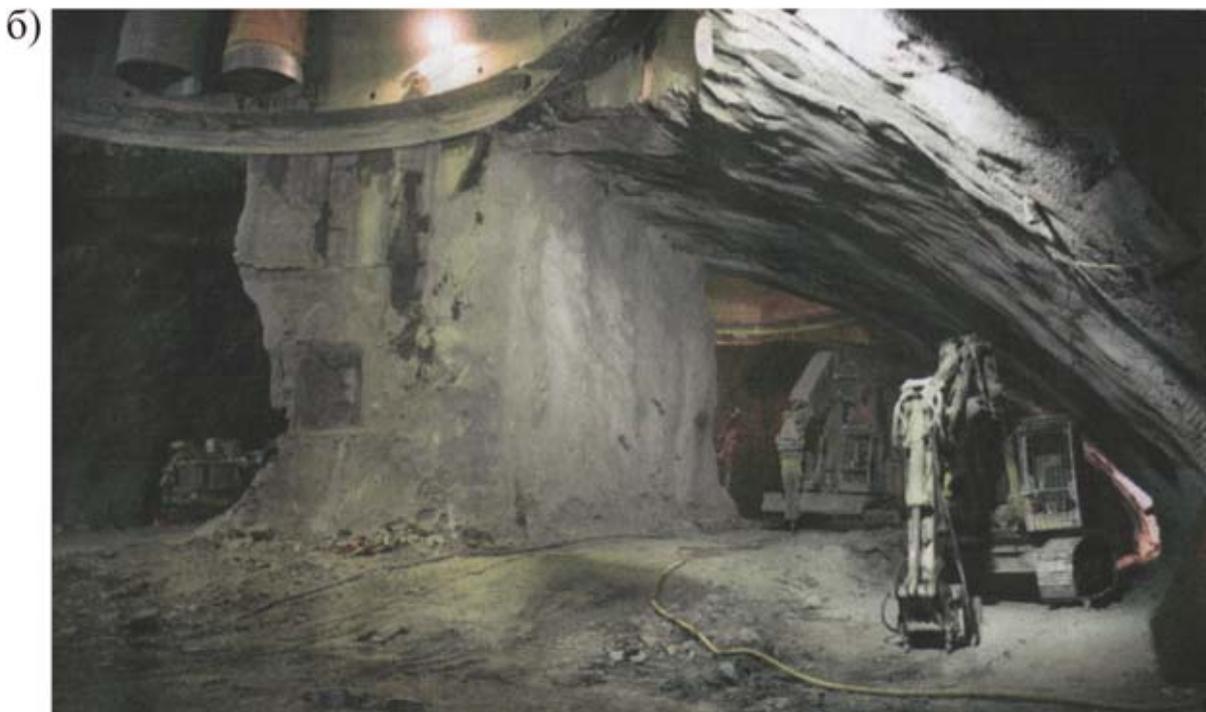


Рис. 4.104. Строительство полости UX15 детектора ATLAS

a)

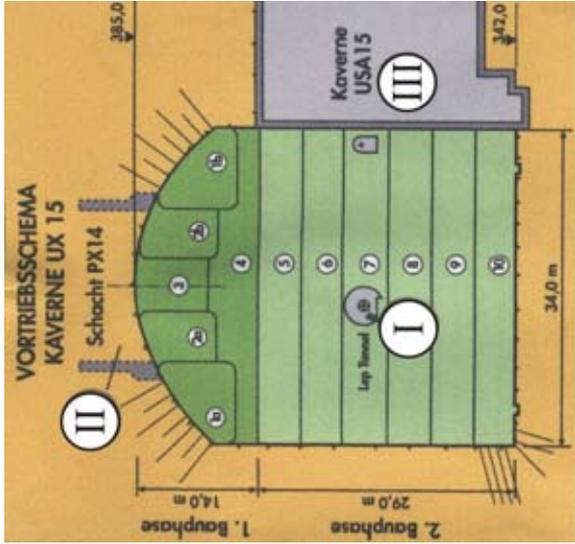


Рис. 4.105. Схема последовательности проходки полости UX15 детектора ATLAS

б)

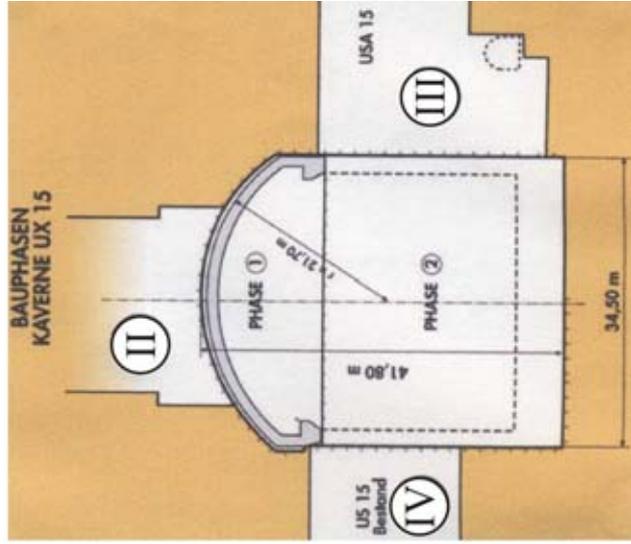
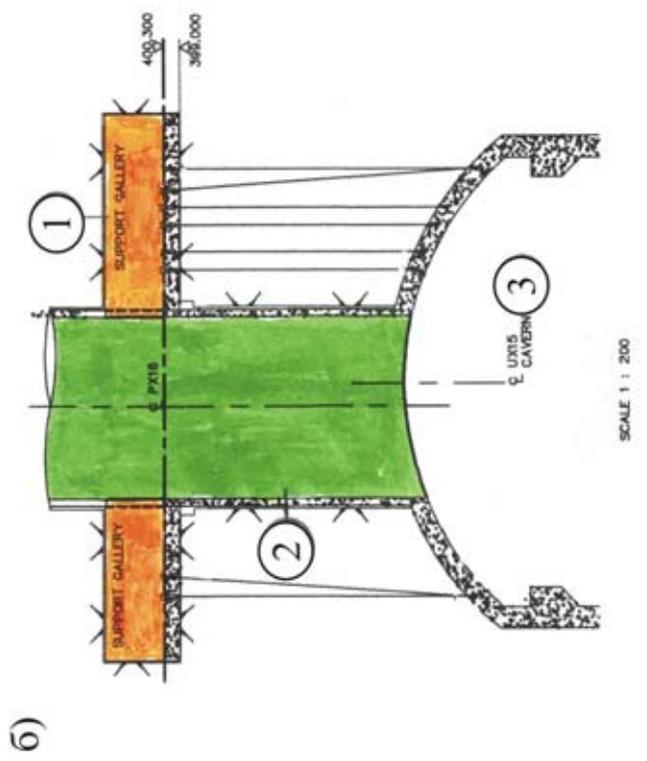
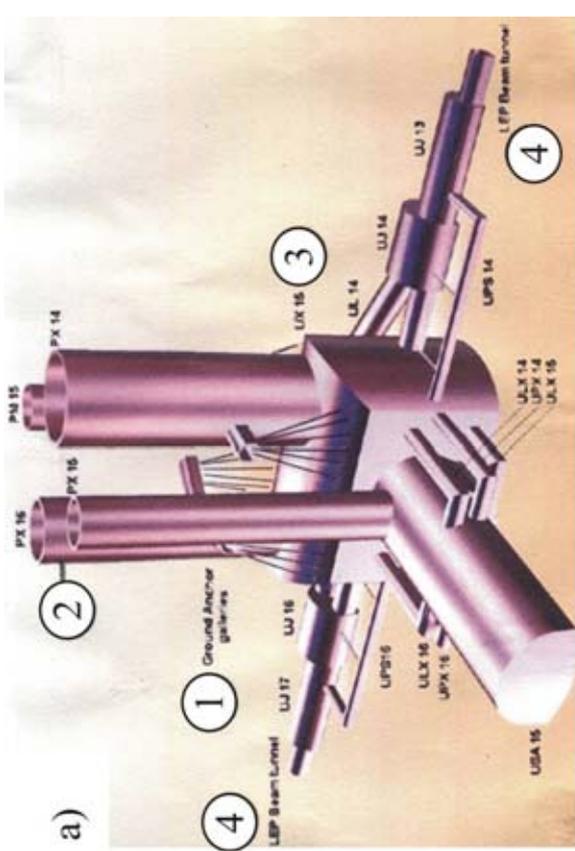


Рис. 4.107. Подвеска кровли полости на анкерных канатах



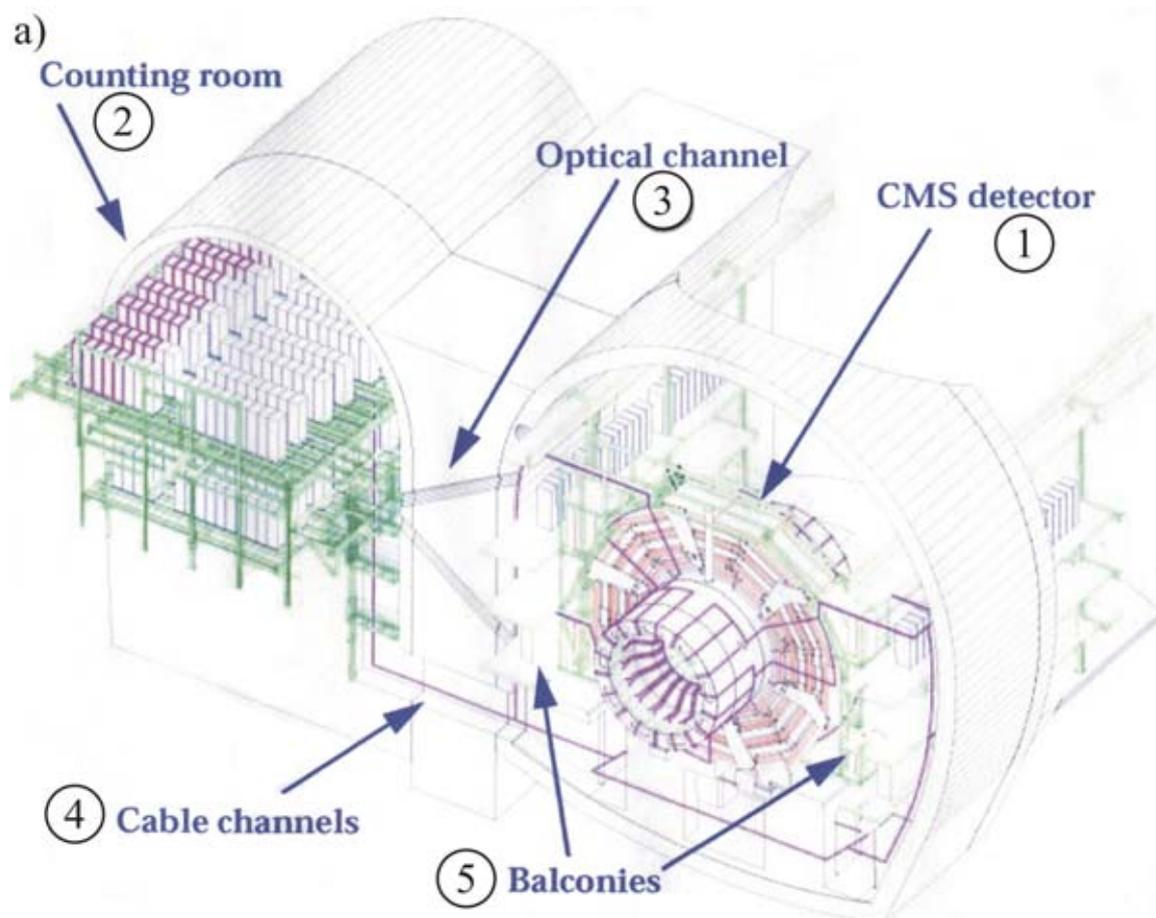
a)



b)



Рис. 4.106. Строительство полости UX15 детектора ATLAS



б)

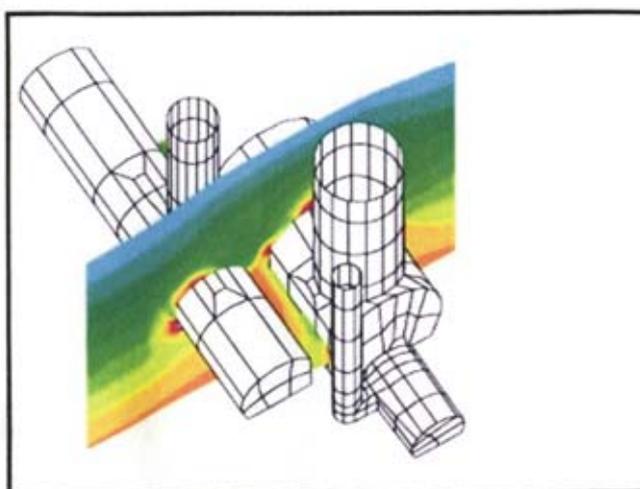


Рис. 4.108. Комплекс CMS в пункте 5

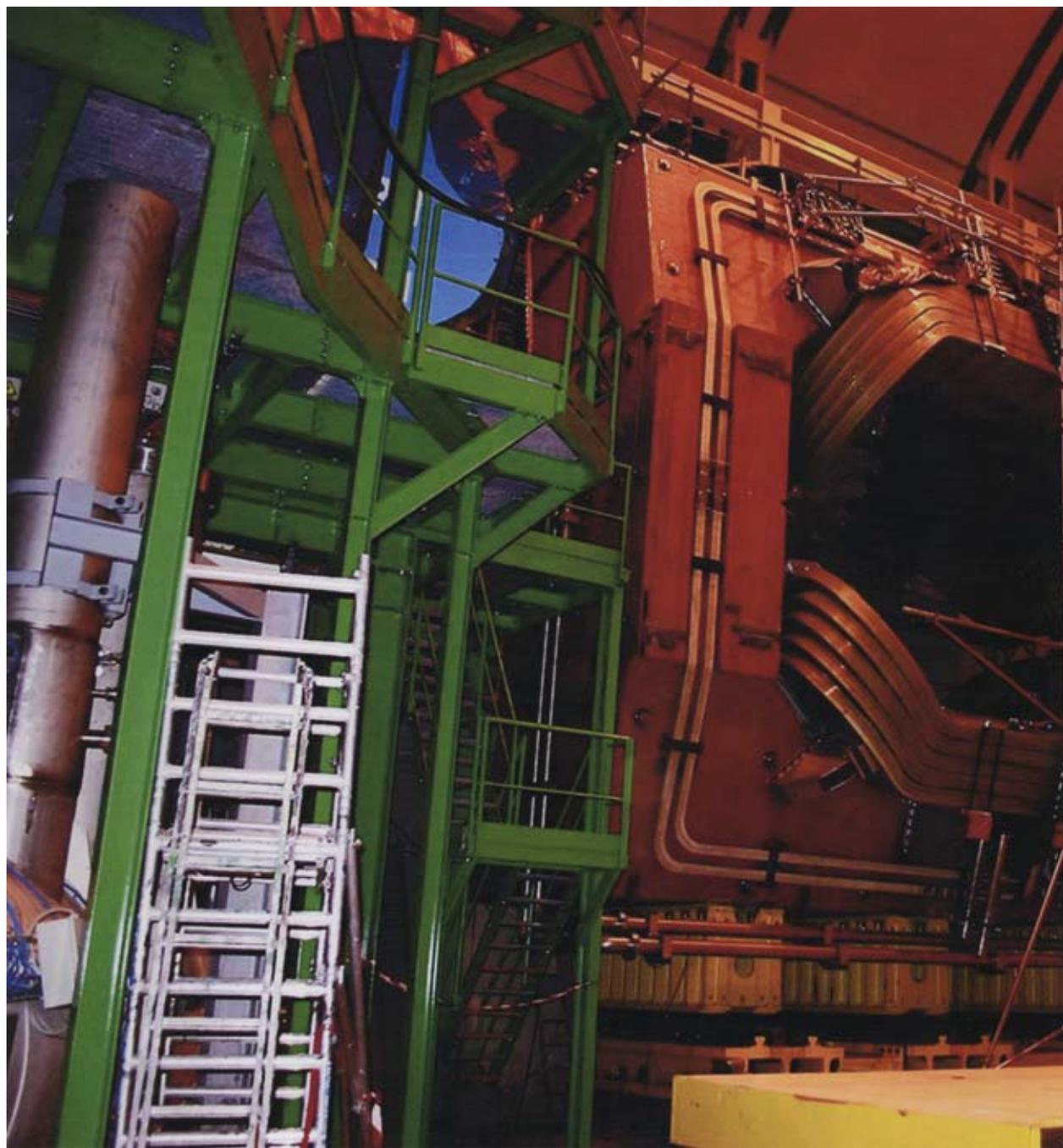
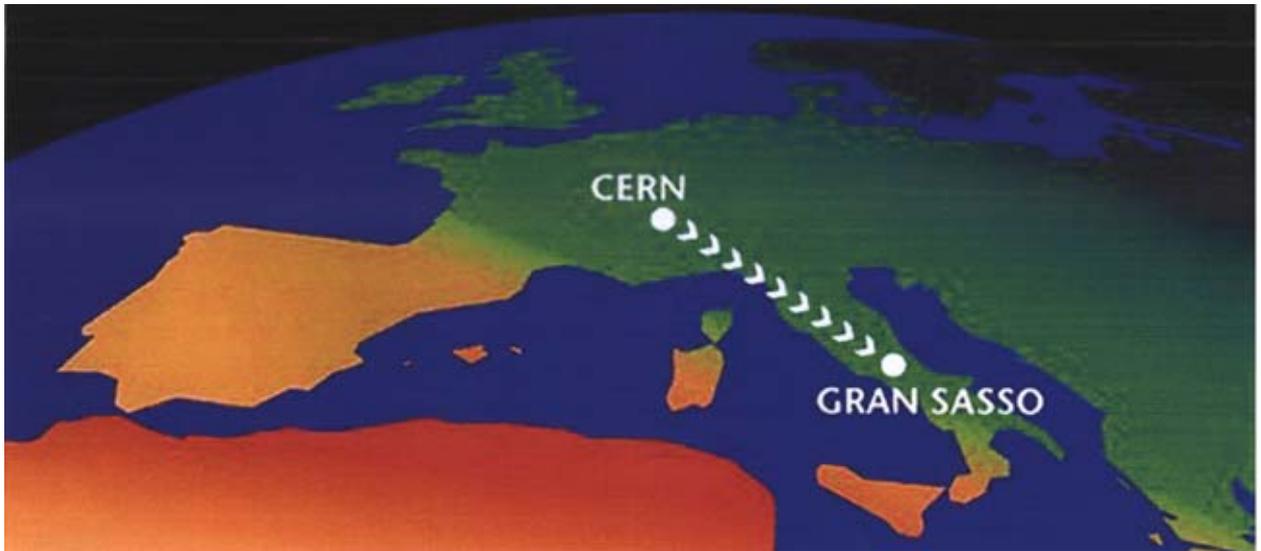


Рис. 4.109. Камера одного из магнитов ускорителя LEP/LHC

a)



b)

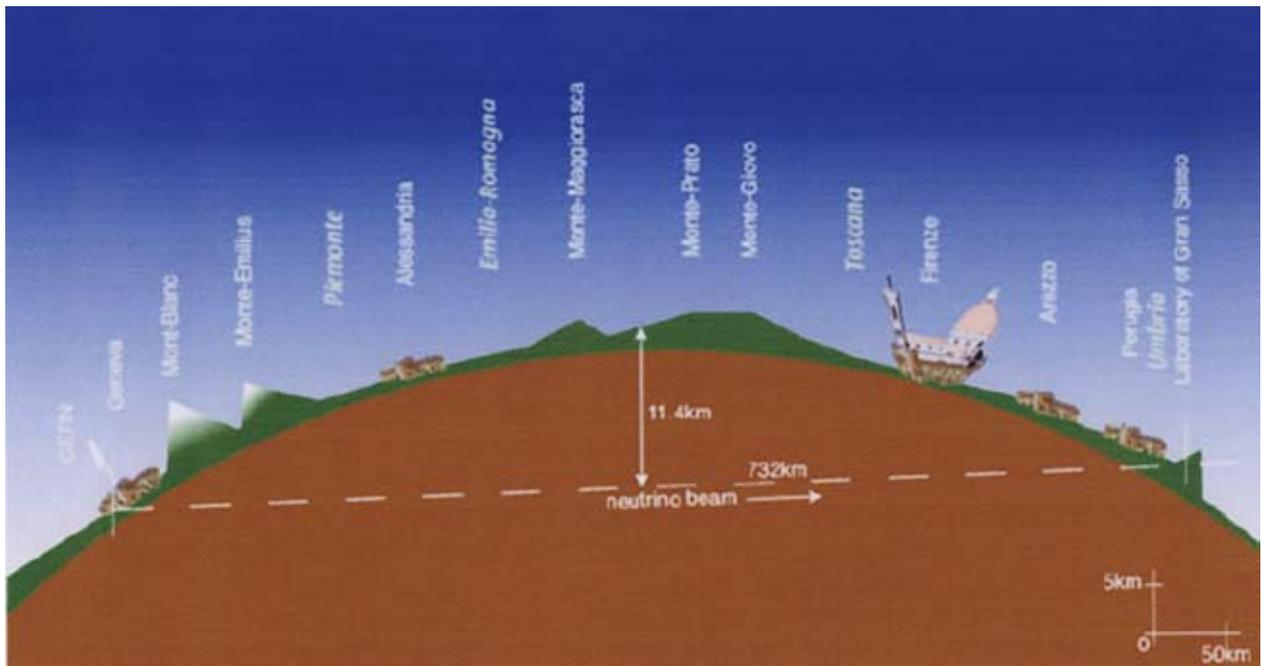


Рис. 4.110. Совместный эксперимент ускорителя CERN с лабораторией Грэн Сэссо

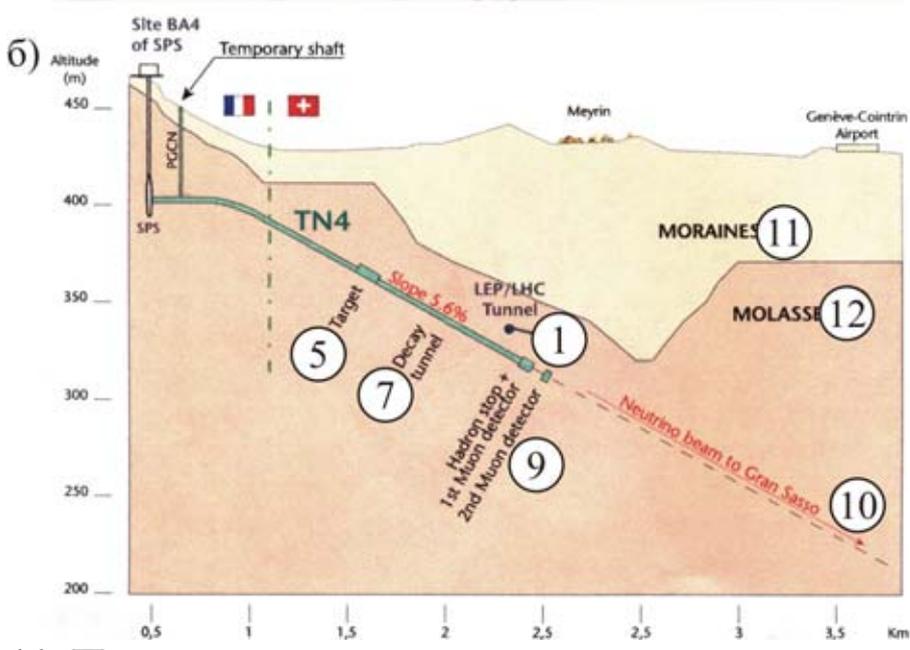
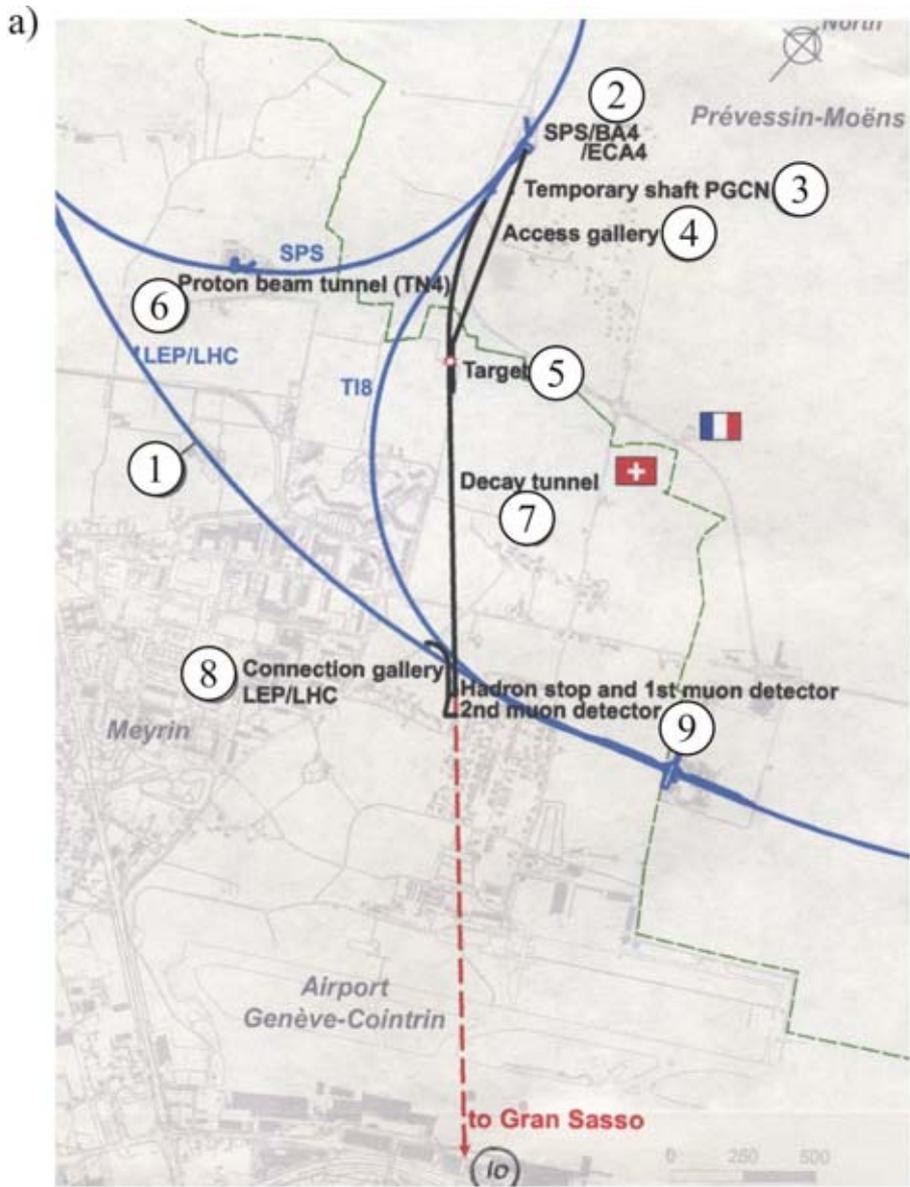


Рис. 4.111. Подземные сооружения совместного эксперимента ускорителя CERN с лабораторией Грэн Сэссо

Наукове видання

*Кауфман Леонід Лазаревич
Лисіков Борис Артемович*

ПІДЗЕМНІ СТРУКТУРИ

(огляд закордонного досвіду)

Частина 1

Монографія

(Російською мовою)
В авторській редакції



Кауфман Леонид Лазаревич – горный инженер, кандидат технических наук. В 1972-1996 гг. – главный инженер проектов проектного предприятия «Донуглепроект», технический директор фирм «Проект», «ПИРС», по совместительству – преподаватель Донецкого института повышения квалификации инженерно-технических работников Минуглепрома Украины. Разработчик десятков осуществленных проектов реконструкции и модернизации шахт Донбасса. Автор более 60 научных работ, в том числе 2

нормативных документов для угольной отрасли, 2 монографий и 2 авторских свидетельств.

Лысиков Борис Артемович – горный инженер, кандидат технических наук. Закончил Донецкий национальный технический университет (ДПИ), профессор этого университета. Автор 6 монографий, 5 учебников и учебных пособий, изданных на русском и французском языках, 200 научных статей, 26 изобретений и патентов.

