

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПУТЬ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ И ЗАХОРОНЕНИЯ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Развитие науки и техники в XX в. привело к созданию военных и народно-хозяйственных систем, функционирование которых основано на использовании ядерной энергии. Военно-промышленным комплексом были созданы ядерные заряды большой мощности с приемлемыми габаритами и массой, позволяющими доставку зарядов к цели носителями различных типов (самолеты, ракеты и др.).

Кроме ядерных зарядов военного назначения, были созданы ядерные реакторы и изотопные установки для транспортных средств (передвижные электростанции для нужд районов Крайнего Севера, космических аппаратов, морских судов военного и народно-хозяйственного назначения). Были созданы также ядерные системы стационарного типа большой ядерной энергетики — ядерные реакторы большой мощности гигаваттного класса [1].

Технологические процессы производства и эксплуатации ядерного топлива сопровождаются наработкой большого количества так называемых короткоживущих и долгоживущих радиоактивных отходов, несущих большую опасность всем живым организмам на Земле, в первую очередь человеку.

Особенно опасны долгоживущие радиоактивные отходы, которые накапливаются с течением времени в больших количествах. Например, загрузка только одного ядерного реактора, подобного энергоблокам Чернобыльской АЭС, составляющая ~190 т, влечет за собой отходы по массе такого же порядка.

Поэтому ученые и общественность многих стран, использующих ядерную энергию, пришли к выводу, что исследования и использование ядерной энергии опасны для человечества, ибо отходы ядерных энергосистем отравят всю нашу планету на тысячи лет, и люди, а также флора и фауна будут обречены на неминуемую гибель.

Вопрос обращения с долгоживущими радиоактивными отходами (ДРО), в частности, их утилизации и захоронения, является проблемой не только украинской ядерной энергетики.

В большинстве стран, владеющих объектами ядерной энергетики (США, Великобритания, Франция, Россия, Япония и др.), начаты работы по созданию хранилищ (национальных и международных) таких отходов в геологических формациях, однако практическому внедрению такого рода проектов препятствуют как технические трудности, так и негативное отношение со стороны общественности.

В Украине идеи о создании хранилищ долгоживущих отходов ядерного топлива в выработках соляных шахт восприняты негативно и большинством специалистов, и общественностью, что также в конечном итоге не способствует решению проблемы по захоронению таких отходов.

Наиболее реальным в настоящее время решением этого вопроса остается, по мнению некоторых специалистов, создание соответствующей инфра-

структуры переработки и сохранения ядерных отходов в Чернобыльской зоне в рамках предприятия «Вектор» [2].

Однако возможности полномасштабного решения этой проблемы специалисты связывают с научно-техническим прогрессом в далекой перспективе.

Возможности решения проблемы захоронения долгоживущих ядерных отходов с использованием ракетной техники рассматриваются в США, России и Украине. Украинским Государственным предприятием (ГП) «Конструкторское бюро «Южное» имени академика М. К. Янгеля» разработана концепция отправки радиоактивных отходов в дальний космос с помощью ракетно-космических комплексов.

ГП КБ «Южное» в сотрудничестве с одной из ве-



дущих европейских компаний Astrium Space Transportation, при финансовой поддержке и участии Европейского космического агентства (ЕКА) выполнило успешное совместное исследование по реализуемости проекта глобальной значимости, касающегося выведения радиоактивных отходов в космос. Этот вопрос рассматривается в публикациях О. Венцовского, Н. Слюняева в межрегиональном журнале «Бизнес-класс» [3; 4].

Однако данная концепция также не решает полностью проблему ликвидации радиоактивных отходов. Мы уже называли недостатки концепции, связанные с опасностью аварии ракеты-носителя с ядерными отходами над планетой, необходимостью пуска большого количества одноразовых ракет относительно небольшой грузоподъемности. Добавим сюда также высокие требования к энергетике носителя, который должен иметь многоступенчатость и скорость, больше первой космической, а также большие финансовые затраты.

Следовательно, необходимо искать эффективный и рациональный способ захоронения долгоживущих радиоактивных отходов на Земле, в ее недрах.

1. Предпосылки использования земной мантии для захоронения долгоживущих радиоактивных отходов

Когда мы рассматриваем и анализируем строение планеты Земля, естественным образом напрашивается мысль о наиболее безопасном и надежном хранилище, каким может стать земная мантия.

Земной шар — жидкий расплав, покрытый лишь снаружи относительно тонкой и твердой земной корой толщиной не более 60 км, а слои мантии и ядра занимают более 99 % объема планеты [8]. В экваториальных областях на этот расплав (магму) при вращении Земли вокруг своей оси действуют силы, направленные, согласно правовинтовой спирали, к Северному полюсу. И, наверное, происходит медленное течение магмы под земной корой в этом направлении. Последние исследования геофизиков склоняют их к убеждению, что под твердой земной корой находится не раскаленная магма, как думали раньше, а твердая, не раскаленная почти до плавления мантия, простирающаяся на глубины до 2 тысяч километров (рис. 1–3) [7; 8; 10]. Так, например, когда магма достигает поверхности, ее температура обычно близка к 1200 °С — горные породы раскалены докрасна и расплавлены. Расплавленная магма, поднимаясь к поверхности, остывает, тяжелеет и снова «тонет». При этом возникают конвективные потоки [7; 8]. Конвективные потоки жидкой магмы (рис. 3) постоянно меняются под жерлом вулкана. До глубины 700 км доходит верхняя мантия, относительно холодная и твердая. На глубине 2 200 км начинается нижняя мантия, где из-за высокого давления и температуры до 3 500 °С вещество мантии находится в вязкотекучем состоянии [9]. На границе «мантия — ядро» (~2 900 км) происходит наиболее резкое для недр Земли изменение физических и химических свойств. Силикатные породы мантии встречаются здесь с железным ядром. Сейсмические данные, полученные геофизиками, свидетельствуют о том, что

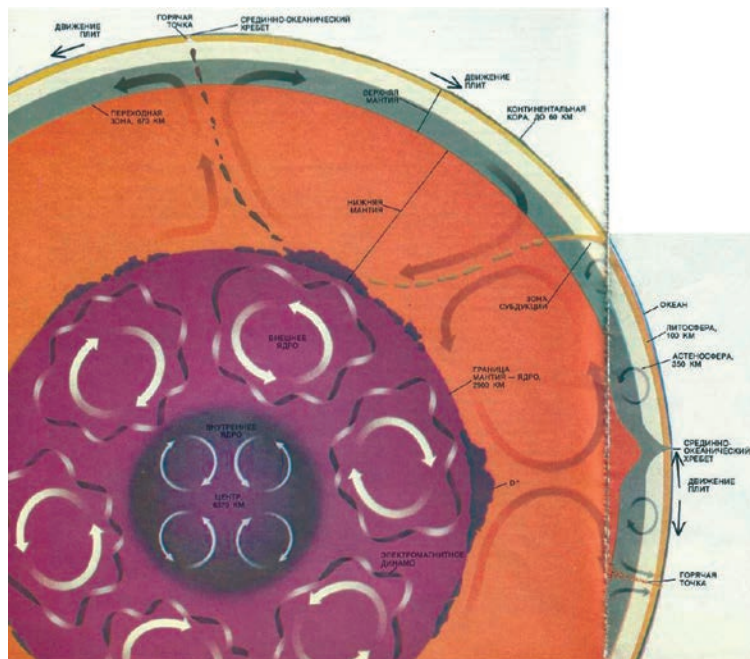


Рис. 1. Внутреннее строение Земли и циркуляция вещества в различных ее зонах

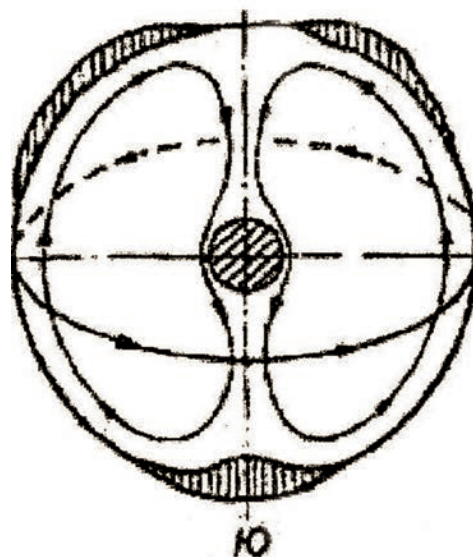


Рис. 2. Схема предполагаемой глобальной циркуляции магмы в недрах Земли

в основании мантии породы находятся в твердом состоянии и текут крайне медленно, в какой-то степени подобно стеклу. И лишь под ней лежит жидкий слой (внешнее ядро), внешняя часть которого имеет примерно консистенцию воды. Бурные движения во внешней, жидкой части ядра, скорость которых в миллион раз превышает течения в мантии, генерируют магнитное поле Земли. Разница в температурах между мантией и ядром может достигать 1 000 °С. В центре внешнего ядра находится твердое (полагают, что из металлического железо-никелевого сплава) ядро Земли. Сложнейшие сейсмические методы позволяют заглянуть даже в твердое внутреннее ядро, внешняя граница которого отстоит от земной поверхности более чем на три четверти радиуса планеты, равного 6 370 км [8]. Но это не очень сильно меняет схему, так как даже твердые горные породы в недрах Земли на глубине всего 10 км становятся

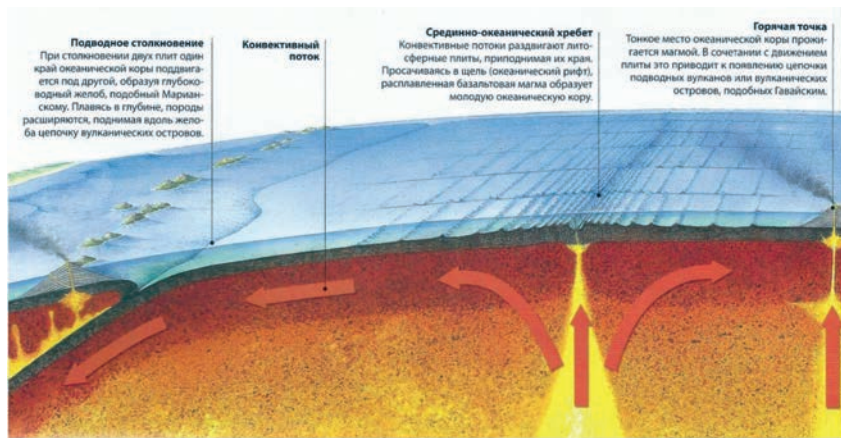


Рис. 3. Циркуляция жидкой магмы в мантии Земли

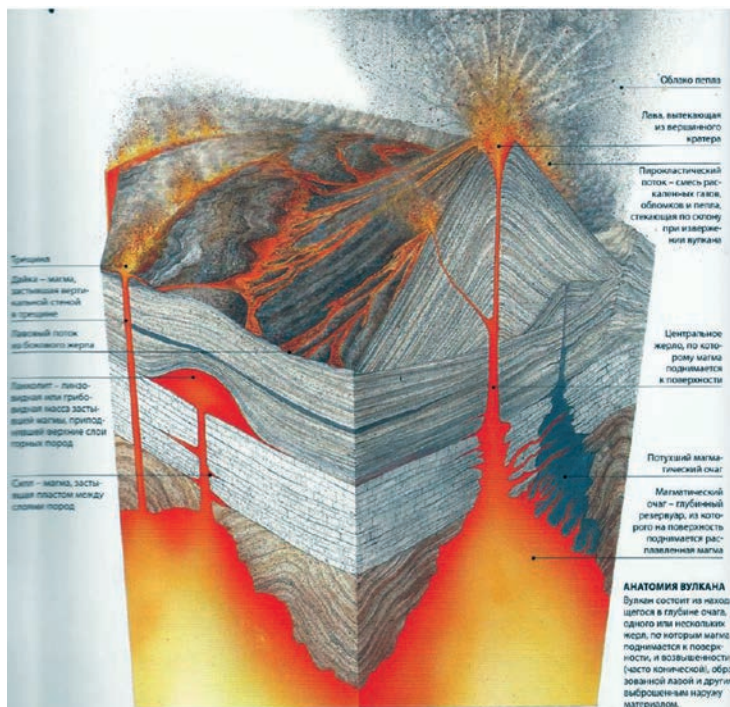


Рис. 4. Анатомия вулкана

текучими из-за того, что давление здесь превышает их предел текучести при таких высоких температурах. И вместо течения магмы, описываемого далее в тексте, необходимо говорить о течении вещества мантии под земной корой. А по оси вращения Земли устанавливается противоток магмы от Северного полюса к Южному. Схема предполагаемой полной циркуляции магмы в недрах Земли представлена на рис. 2 [10].

Циркуляция жидкой магмы в районе жерла подводного и островного вулканов представлена на рис. 3.

Внутренняя структура (анатомия) типичного вулкана приведена на рис. 4 [7].

Исходя из наличия жидких слоев в недрах Земли, а также присутствия выходов магмы на ее поверхность через многочисленные вулканы, имеющиеся как на суше, так и в глубинах Мирового океана, можно определить возможный путь захоронения долгоживущих ради-

оактивных отходов в земной мантии через кратеры вулканов. На рис. 5 [7] показано местонахождение вулканов — «горячих» точек на земной поверхности, из которых выбирают потенциальные места входа в мантию Земли.

Горячие точки представляют собой вулканически активные области, которые в течение многих миллионов лет остаются в одном и том же положении по мере того, как мимо них скользят литосферные плиты, несущие на себе континенты. Очевидно, горячие точки происходят из неподвижного и, следовательно, чрезвычайно глубокого источника, который прожигает себе путь через континенты или морское дно, когда они медленно дрейфуют по мантии [8].

2. Путь по реализации концепции захоронения долгоживущих радиоактивных отходов в земной мантии

Из сказанного выше предлагается процесс захоронения долгоживущих радиоактивных отходов в земной мантии путем доставки их в контейнере, устанавливаемом в головной части ракеты-носителя, к кратеру вулкана и транспортировки его через жерло в земные недра. Более рациональным путем доставки контейнера с долгоживущими радиоактивными отходами представляется использование ракетного комплекса «Морской старт» (рис. 6) [5; 6].

Анализ современных эксплуатируемых ракет-носителей космического назначения показал, что наиболее подходящей для реализации концепции захоронения долгоживущих радиоактивных отходов в кратере вулкана подходит по своим характеристикам первая ступень ракеты-носителя «Зенит», имеющая грузоподъемность ~ 110 тс, или созданный на ее основе ракетный модуль 11С25 блока А ракеты-носителя 11К25 «Энергия» [5; 6], работающие на экологически чистых компонентах ракетного топлива (горючее — керосин, окислитель — жидкий кислород).

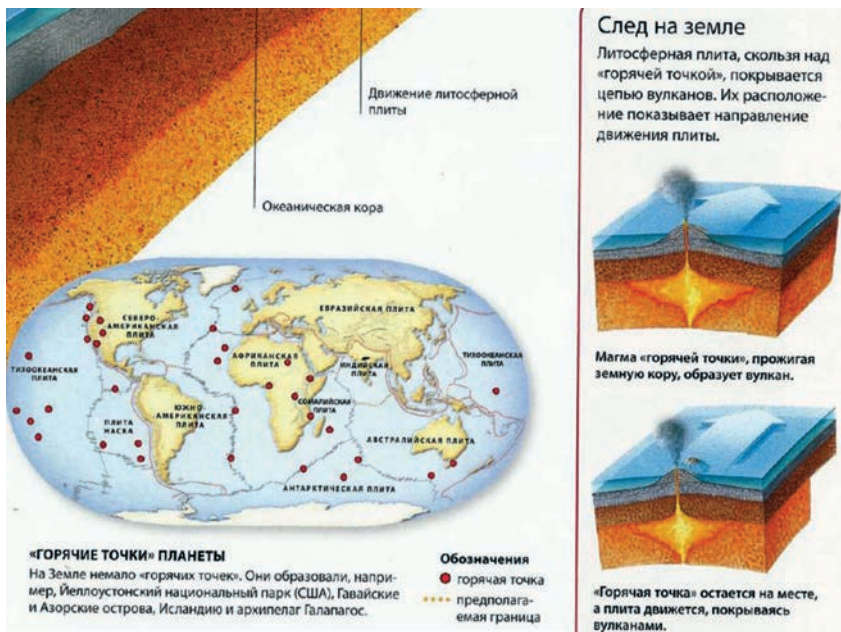


Рис. 5. «Горячие точки» планеты Земля

Поэтому предлагается разработать одноступенчатую ракету-носитель «Астра». Она должна состоять из универсального ракетного модуля (УРМ) многократного использования (до ~20 раз, как это реализовано при создании модулей 11С25 бола А), являющегося первой ступенью, а также головной части, содержащей контейнер с долгоживущими радиоактивными отходами (рис. 7, 8). Устанавливаемый в хвостовом отсеке УРМ маршевый жидкостный ракетный двигатель РД-170 с качающимися камерами сгорания обеспечивает управляемый полет РН «Астра» на активном участке траектории. На наружной поверхности хвостового отсека устанавливают четыре тормозных двигателя, обеспечивающих торможение ступени при отделении ее от головной части. В верхней части УРМ над верхним днищем топливного отсека устанавливают переходник (адаптер), соединяющий УРМ с головной частью. УРМ оснащается также приборами системы управления полетом РН на активном участке траектории, а также системой спасения.

Универсальный ракетный модуль, как и ракету-носитель «Астра», в целом целесообразно разрабатывать в Украине, а именно в ГП «Конструкторское бюро «Южное» имени академика М. К. Янгеля». Изготовление составных частей РН и ГЧЗО необходимо будет

3. Инфраструктура ракетного комплекса для реализации концепции захоронения долгоживущих радиоактивных отходов в земной мантии через кратер вулкана

Если рассматривать в качестве потенциальных для проведения захоронения долгоживущих радиоактивных отходов вулканы, находящиеся в Индийском океане и на прилегающих материках и островах, а также в Тихом океане, то предлагается в качестве обслуживающей базы арендовать и использовать космодром Италии Сан-Марко, расположенный на восточном побережье Африки. Для обеспечения функционирования космодрома по программе захоронения ДРО его необходимо будет соответствующим образом дооборудовать.

Как уже отмечалось выше, для старта ракеты-носителя «Астра» могут быть использованы плавучая платформа «Одиссей» (см. рис. 6), а в качестве командного пункта для реализации процессов управления пуском РН «Астра» — сборочно-командное судно из состава ракетного комплекса «Морской старт».

В процессе проектных разработок целесообразно рассмотреть также вариант создания на космодроме Сан-Марко стационарного пускового комплекса и командного пункта.



Рис. 6. Ракетно-космический комплекс «Морской старт»: слева — сборочно-командное судно (СКС); справа — плавучая платформа «Одиссей»

Для транспортировки первых ступеней, конструктивных частей ГЧЗО (в том числе контейнера с долгоживущими радиоактивными отходами) целесообразно использовать железную дорогу, соединяющую «Южмаш» (г. Днепр) и морской порт г. Черноморска (бывший Ильичевск).

На территории Украины необходимо построить предприятие по утилизации радиоактивных отходов, поступающих от АЭС, и загрузки долгоживущих радиоактивных отходов в контейнеры, предназначенные для комплектации ГЧЗО.

4. Основные технологические компоненты для проведения работ по захоронению долгоживущих радиоактивных отходов ракетным комплексом «Морской старт»

На арендном космодроме Сан-Марко должно быть оборудовано хранилище для универсальных ракетных модулей, построен монтажно-испытатель-

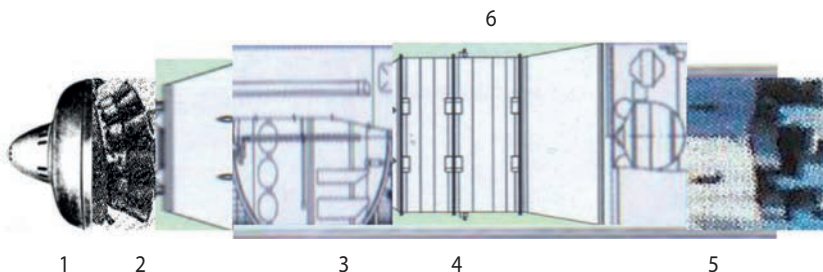


Рис. 7. Компоненка головной части ракеты «Астра» (концептуальная схема):
 1 — устройство формирования каверны в магме, а также размещенный внутри контейнер с приборами тепловой головки самонаведения;
 2 — сопловой блок для выхлопа газообразного азота, создающего тягу;
 3 — отсек с баком для жидкого азота;
 4 — контейнер с долгоживущими радиоактивными отходами;
 5 — ступень наведения; 6 — цилиндрическая часть обтекателя

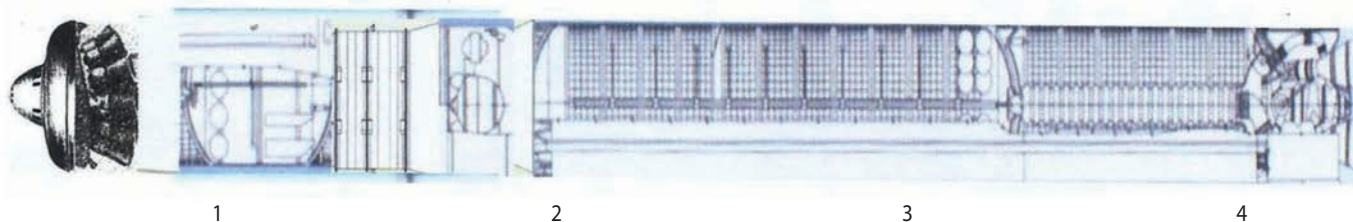


Рис. 8. Компоненка ракеты-носителя «Астра» (концептуальная схема):

1 — головная часть; 2 — переходник; 3 — топливный отсек ступени; 4 — хвостовой отсек с маршевым двигателем РД-170

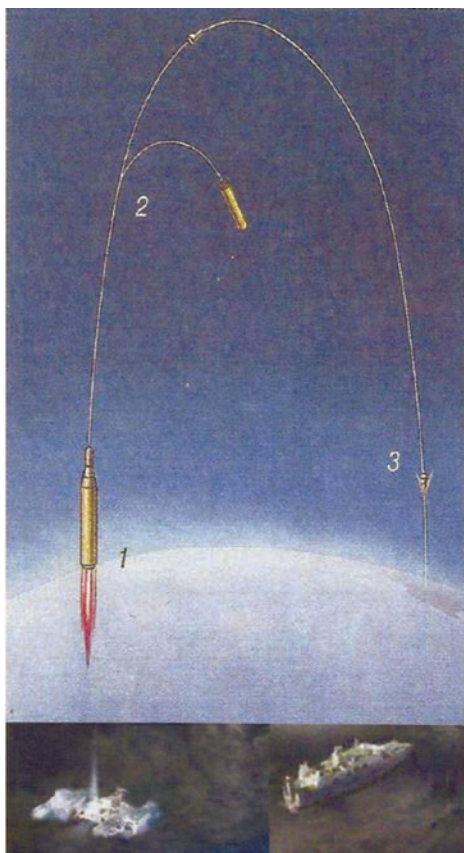


Рис. 9. Пуск и полет ракеты-носителя «Астра»:

- 1 — ракета-носитель «Астра» в полете на активном участке траектории;
- 2 — отделение отработавшего универсального ракетного модуля от головной части и падение его в океан;
- 3 — автономный полет головной части и подлет ее к вулкану

ный корпус (МИК) для проведения работ по проверке функционирования агрегатов и аппаратуры универсального ракетного модуля. Аналогичное хранилище и МИК должны быть созданы и для головной части захоронения долгоживущих радиоактивных отходов.

Причал порта космодрома должен позволять прием и стоянку предназначенных для транспортировки составных частей ракеты-носителя «Астра» сухогрузов, а также сборочно-командного судна и плавучей платформы «Одиссей», проведение необходимых погрузочно-разгрузочных работ. Кроме того, порт космодрома должен позволять прием, стоянку и осуществление необходимых погрузочно-разгрузочных работ, проводимых с танкерами, перевозящими необходимые компоненты ракетного топлива.

На космодроме должны быть созданы хранилища компонентов ракетного топлива и жидкого азота. При необходимости должна быть предусмотрена возможность создания завода по производству жидкого кислорода и жидкого азота.

5. Проведение работ по захоронению долгоживущих радиоактивных отходов

В порту космодрома Сан-Марко на сборочно-командном судне производится окончательная сборка головной части и ракеты-носителя «Астра». После окончательной сборки проводят проверку всех систем РН «Астра» и ее головной части. По завершении

проверочных работ ракета-носитель «Астра» перегружается на плавучую платформу «Одиссей». Затем сборочно-командное судно и плавучая платформа «Одиссей» уходят в район пуска РН «Астра».

В районе пуска осуществляется установка ракеты-носителя «Астра» на пусковое устройство и заправка ее баков компонентами топлива, а также жидким азотом. После проведения окончательных проверок производится пуск ракеты-носителя «Астра» в сторону вулкана (рис. 9).

В полете после отработки УРМ РН на высоте ~ 50 км модуль отделяется от ГЧЗО, падает в океан и затем спасательной командой поднимается на борт СКС. Платформа «Одиссей» и сборочно-командное судно возвращаются в порт космодрома Сан-Марко для подготовки УРМ и следующей ГЧЗО к новому пуску.

ГЧЗО после отделения от УРМ продолжает полет по баллистической траектории. Максимальная высота подъема ГЧЗО над поверхностью Земли может достигать ~ 120 км. На ниспадающей части траектории полета (на высоте ~ 70 км) включается тепловая головка самонаведения, производя поиск вулкана в угле действия $\pm 5^\circ$ при дальности ~ 70 км и корректировку траектории полета к нему. На высоте ~ 1 км производится точная корректировка полета, обеспечивающая влет ГЧЗО в жерло вулкана, включаются генератор производства газа высокого давления из жидкого азота и устройство образования каверны в жидкой магме, а также для создания тяги. ГЧЗО влетает в кратер вулкана (рис. 10) и осуществляет движение по жерлу в каверне жид-

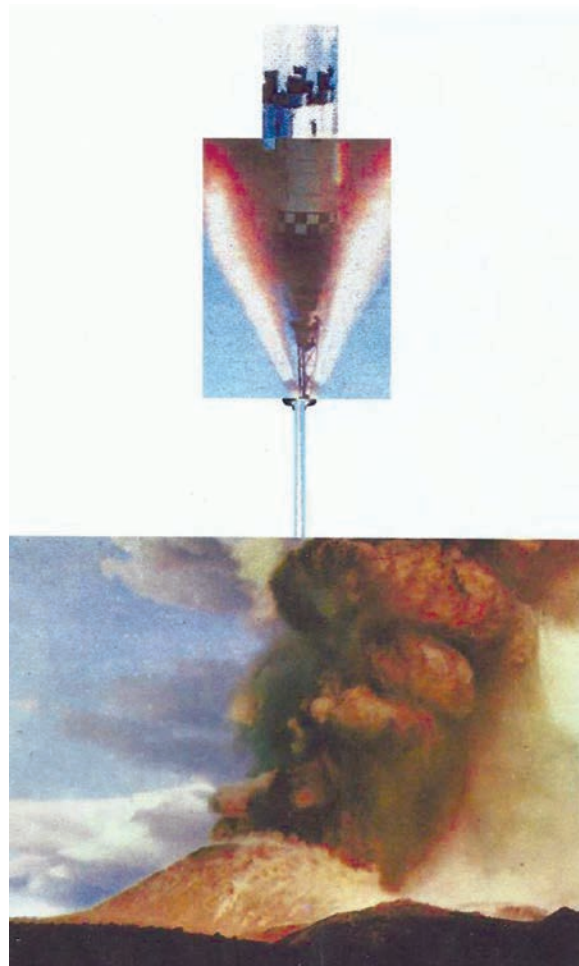


Рис. 5. «Горячие точки» планеты Земля

кой магмы, созданной газообразным азотом высокого давления.

Кроме того, истечение из сопел газообразного азота под высоким давлением обеспечивает центровку ГЧЗО вдоль оси жерла и ее движение вглубь Земли в область мантии. Свободное, без касания стенок жерла движение ГЧЗО может происходить в связи с большими диаметрами жерла, составляющими от десятков до нескольких сотен метров (при диаметре кратера до ~ 1 км) в зависимости от мощности вулкана. Конвективные потоки жидкой магмы (см. рис. 3) уносят ГЧЗО от жерла вулкана. В дальнейшем происходит ее опускание в направлении центра Земли в зоны с более высокими давлениями и температурами, обусловленными воздействием гравитации. Опускание ГЧЗО вглубь мантии под действием высоких температур и давлений приводит к разрушению конструкции ГЧ (смятию и схлопыванию топливных баков и емкости жидкого азота, что уменьшает ее плавучесть), расплавлению металлических частей и деструкции неметаллических материалов, а также разрушению веществ долгоживущих радиоактивных отходов и перемешиванию разрушенной массы ГЧ с веществом жидкой мантии. Это приводит к рассеиванию ДРО, что исключает всякую возможность возникновения взрыва, а также выброса долгоживущих радиоактивных отходов на поверхность Земли с больших глубин.

Таким образом, по предварительным оценкам, захоронение ДРО в земной мантии через кратер вулкана является более безопасным, экологически чистым и экономически выгодным способом по сравнению со способами захоронения долгоживущих радиоактивных отходов, которые ранее рассматривались специализированными организациями стран, эксплуатирующих АЭС.

ВЫВОДЫ

1. Существует принципиальная возможность для утилизации и захоронения долгоживущих радиоактивных отходов ядерно-энергетической деятельности промышленности предлагаемым способом захоронения в мантии Земли через кратер вулкана.

2. Для практической реализации концепции утилизации и захоронения долгоживущих радиоактивных отходов через доставку его с помощью ракеты-носителя контейнера с долгоживущими радиоактивными отходами и направления в кратер вулкана целесообразно создать концерн, включающий предприятия стран, использующих ядерные, ракетные технологии и нуждающиеся в захоронении долгоживущих радиоактивных отходов.

3. Объединение финансовых, промышленных, технологических возможностей стран, использующих ядерное топливо, позволит успешно решить проблему утилизации и захоронения долгоживущих радиоактивных отходов в земной мантии через кратер вулкана.

4. Для экспериментальной проверки реализуемости концепции захоронения ДРО в земной мантии, а также подтверждения точностных характеристик системы управления при наведении ГЧ в жерло вулкана целесообразно провести пробный пуск ракеты «Астра» с ГЧ, имеющей контейнер с макетом груза в инертном исполнении. (Для этих целей может быть использован действующий вулкан Биг Бен, расположенный на острове Херд, принадлежащий Австралии и находящийся в южной части Индийского океана).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Атомная наука и техника в СССР /ред. кол.: И. Д. Морехов (предс.), А. А. Задикян, А. К. Круглов и др. М.: Атомиздат, 1977.
2. Енергетична безпека України. Стратегія та механізми забезпечення / за заг. ред. директора ДФНІСД, д-ра техн. наук, проф. А. І. Шевцова; Нац. ін-т стратег. досліджень, Дніпропетр. філіал. Дніпропетровськ: Пороги, 2002.
3. Венцовский О. Интеграция Украины в Европейское космическое сообщество: проблемы и перспективы // «Бизнес-класс»: межрегион. журн. Днепропетровск, 2011. № 26 (2).
4. Венцовский О., Слюняев Н. Глобальные космические проекты и возможный вклад КБ «Южное» в их реализацию // «Бизнес-класс»: межрегион. журн. Днепропетровск, 2011. № 26 (2).
5. Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» имени академика М. К. Янгеля», Ракеты и космические аппараты Конструкторского бюро «Южное» / под общ. ред. Ген. конструктора, академика НАН Украины С. Н. Конюхова. Днепропетровск, 2000.
6. Всемирная энциклопедия космонавтики / ред. совет: Ю. Н. Коптев (предс.), В. В. Алавердов, Н. А. Анфимов, и др. М.: Военный Парад, 2002.
7. Энциклопедия «Ридерз дайджест». Планета Земля. Киев, 2008.
8. Кори С. Пауэлл. Вглядываясь вглубь. В мире науки = SCIENTIFIC AMERICAN. Издание на русском языке. М.: Мир, 1991.
9. Ридерз дайджест. Большой атлас мира. Отпечатано в Сингапуре, 2007.
10. Потапов Ю. С., Фоминский Л. П., Потапов С. Ю. Энергия вращения. Черкассы: ОКО-Плюс, 2000.

По мнению члена редакционной коллегии Л. Ф. Черногора, идея автора не лишена некоторых недостатков. По-прежнему, как и в случае с транспортировкой радиоактивных отходов в космос, сохраняется опасность аварии ракеты-носителя с ядерными отходами над планетой, необходим запуск большого количества (десятков-сотен) одноразовых ракет, остаются высокими требования к энергетике ракеты, ничуть не уменьшаются финансовые затраты. Кроме того, нет никакой гарантии, что вулканы не выбросят радиоактивные вещества в атмосферу. Существует опасность, что вмешательство в «жизнь» вулкана может спровоцировать преждевременный выброс.