

2. Техногенноизмененные формы рельефа (уплотненные поверхности грунтовых дорог на орошаемых землях).

3. Техногенносозданные ирригационные формы рельефа:

3.1. Техноглиптогенные (от греч. *glyptos* – “вырезанный”) ирригационные формообразования (спланированные путем срезки неровностей поверхности, оросительные каналы (укрепленные плитами и земляные), дренажные и сбросные земляные каналы, выемки и др.).

3.2. Технолитные ирригационные формообразования (спланированные насыпные поверхности, каналы в насыпи, насыпные плотины и дамбы, оградительные валы, валики чехов – участков орошаемого поля рисовых систем и др.).

4. Техноплагенновозникшие (от лат. *plaga* – “толчок”) ирригационные формы рельефа:

4.1. Техноплагенные ирригационно-эрозионные формообразования (борозды, водороины, промоины, овраги).

4.2. Техноплагенные ирригационно-аккумулятивные формообразования (прикапальные валики, конусы выноса).

4.3. Техноплагенные ирригационно-суффозионные формообразования (блюдецобразные понижения, западины, суффозионно-просадочные полости и провалы, трещины в грунтах).

4.4. Техноплагенные ирригационно-обвальные формообразования (обвалы, оползни, оползневые террасы на откосах каналов, оплывины).

5. Рельефоподобные морфообразования:

5.1. Ирригационные рельефиды (короткоструйные, среднеструйные, дальнеструйные дождевальные агрегаты, тракторы, автомашины, каналокопатели, поливные сборно-разборные трубопроводы и др.).

5.2 Ирригационные рельефоиды (стационарные инженерные сооружения – насосные станции, железобетонные лотки на опорах, акведуки, мосты).

УДК 551.4.08

© 2009 г. Б.Т. КОЧКИН, Б.И. ОМЕЛЬЯНЕНКО, В.А. ПЕТРОВ

**ЗАХОРОНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ:
РЕАЛЬНОСТЬ И ПРОЖЕКТЫ
(КРИТИКА ПУБЛИКАЦИЙ А.В. ИЛЬИНА В ЖУРНАЛЕ
“ГЕОМОРФОЛОГИЯ” № 3, 2007 г. и № 1, 2008 г.)**

Проблема радиоактивных отходов (РАО), накопленных в результате военной и гражданской деятельности, несомненно, требует решения. Особенно опасны так называемые высокорadioактивные отходы (ВАО). Объемы их сравнительно невелики, но они отличаются чрезвычайной продолжительностью периода своего существования до естественного распада. Реальным на сегодня способом решения этой проблемы мировое сообщество признает технологию подземного захоронения. Очевидная цель первой статьи А.В. Ильина [1] – показать невозможность реализации этой технологии в глазах читателей журнала “Геоморфология”, что можно было оставить без внимания, если бы утверждение о “невозможности” не подразумевало обвинения в некомпетентности всей армии ученых, занятых в проблеме. Тенденциозность А.В. Ильина выражается в избирательности цитирования обширной литературы, имеющейся по затронутой проблеме, и в превратном толковании цитируемого.

Основные научные контраргументы А.В. Ильина в отношении подземного размещения РАО сводятся к следующему. Горные породы всегда трещиноваты, нет абсолютно непроницаемых массивов скальных пород. Проницаемы для подземных вод

любые другие типы пород: глины, соли, вечномёрзлые грунты. Попадание радионуклидов в биосферу с подземными водами обязательно произойдет при размещении РАО в любой области континентов. Трещиноватость и проницаемость массивов зависят от активности земной коры, поэтому прогноз поведения системы не осуществим, а надежная изоляция РАО в скальных и других породах на весьма продолжительные отрезки времени невозможна. Вывод из этого анализа – необходимо “... от исторического варианта захоронения перейти к геологическому...” при “... полной изоляции от внешней среды...” [1, с. 12], что, по мнению А.В. Ильина, можно осуществить на дне Мирового океана.

Технология подземного размещения предусматривает мультибарьерную защиту окружающей среды. Часть барьеров будет создана искусственно (инженерные барьеры), другая часть присуща самой геологической среде. Инженерные барьеры рассчитываются на сотни лет надежного функционирования, а далее утечка радионуклидов из хранилища неизбежна и именно геологическая среда будет препятствовать поступлению в биосферу радионуклидов в опасных для населения количествах в течение всего периода их существования в сотни тысяч и миллионы лет. Эта технология уже является “геологическим” захоронением, основанным на принципе управляемого рассеивания, а не “полной изоляции”, что действительно невозможно. В качестве геологических барьеров учитывается не только “непроницаемость” нетрещиноватых горных пород, обеспечивающая физическую изоляцию РАО, но также сорбционные свойства пород и физико-химические условия в подземных водах, которые в совокупности способны обеспечить геохимическую изоляцию радионуклидов в ограниченном объеме недр.

В частности, если средой размещения будут служить кристаллические породы, особое внимание уделяется изучению трещиноватости, которая будет формировать каналы поступления радионуклидов в биосферу. Геологи, занятые в проблеме, это прекрасно осознают и перспективные участки выбираются в тектонически стабильных регионах вне зон крупных разломов, которые не должны располагаться ближе, чем 100 м от крайней канистры с ВАО. В пределах блока размещения допускается существование только мелких трещин, общее продвижение загрязнителей по которым в условиях застойного гидродинамического режима будет предельно ограниченным. Одним из важнейших видов исследований перспективных площадок является изучение трещинной проводимости массива кристаллических пород и ее связи с полем тектонических напряжений, а также эксперименты по выявлению каналов фильтрации, например, с помощью маркеров, которые проводятся уже в специальных подземных лабораториях. Изучением геометрии проницаемых каналов массива дело не ограничивается. Изучаются геохимические свойства пород и подземных вод, чтобы оценить реальную степень замедления продвижения радионуклидов в геосфере. Главная цель детальных геолого-гидрогеологических работ в этих лабораториях – доказать безопасность хранилища, которая должна подтверждаться численным прогнозом рассеивания радионуклидов в массиве, а достоверность этого прогноза должна основываться на результатах комплексных исследований и длительном мониторинге вплоть до бесспорного подтверждения безопасности системы защиты и принятия решения об окончательном захоронении.

Вся критика технологии подземного захоронения, реализуемой во всем мире, нужна А.В. Ильину для продвижения идеи захоронения ВАО в осадках на морском дне [2].

Следует отметить, что проекты морской технологии, например, путем затопления канистр с ВАО, свободно падающих с поверхности океана в осадки, уже рассматривались ранее. Как и под землей, инженерные барьеры не способны обеспечить полную изоляцию радионуклидов от подземных (“поддонных”) вод на практически неограниченный срок – любая упаковка с отходами рано или поздно придет в негодность. Тем не менее, уже в 70–80-х гг. прошлого века были определены районы, перспективные для подводного захоронения с точки зрения геологических условий – абиссальные равнины океанического дна. В качестве критериев выбора места для захоронения ВАО в осадках морского дна, можно привести критерии, сформулированные группой

исследователей из Сандийской национальной лаборатории (США) еще в 1984 г. [3]. Топография дна должна характеризоваться минимальным уклоном для устойчивости осадков, а структура их поверхности должна быть плоской. Тектоническая стабильность района должна подтверждаться непрерывностью осадконакопления за период не менее 250 тыс. лет. Для достаточной гарантии изоляции канистр с ВАО мощность осадков не может быть менее удвоенной глубины расчетного проникновения канистр. Сами осадки должны обладать вязкоупругими физико-механическими свойствами, максимальной сорбционной способностью и минимальной нарушенностью донными организмами. Адвекция поровых вод должна быть менее скорости диффузии радионуклидов в водонасыщенных осадках.

В пределах таких геоморфологических структур, как абиссальные равнины, условия на дне океанов достаточно стабильны, а строение осадочной толщи просто, что предельно облегчает изучение структуры потока рассеивания радионуклидов в геосфере. Тем не менее, возможность получения данных, необходимых для достоверного прогноза рассеивания радионуклидов на многокилометровой глубине, технически гораздо сложнее, чем в наземных шахтах. Кроме того, крайне сложно прервать размещение, если обнаружится аварийная утечка, или канистра по каким-либо причинам не погрузится на достаточную глубину. В целом проект захоронения на абиссальных равнинах океанического дна не исключает проблем, которыми А.В. Ильин пытается “закрыть” подземное захоронение – неизбежный контакт ВАО с водой и сложность доказательства безопасности, но имеет дополнительные и трудно преодолимые научные и технические проблемы в реализации. Прежде всего, это касается выполнения достоверного прогноза рассеивания радиоактивности вокруг могильника, без которого, в соответствие с принципами безопасности захоронения, принятыми во всем мире, нельзя получить лицензию на производство подземного (подводного) размещения.

А.В. Ильин отвергает абиссальные равнины как потенциальные районы подводного захоронения из-за малой мощности осадков и низкой скорости их накопления и пропагандирует иную, вполне оригинальную идею – захоронение РАО под слоем осадков, формирующихся в результате подводных оползней [2]. Для ее реализации идеально подходят континентальные склоны и их подножия. Здесь мощность осадков измеряется километрами, а установленные мощности оползневых тел достигают сотен метров. Основная проблема, от которой зависит реализация идеи, по мнению ее автора, – “в нужном месте и в нужное время создать условия, необходимые для возникновения подводного оползня” [2, с. 11], который надежно изолирует опасные вещества от среды обитания человека.

Оценка безопасности проекта, на проведение которой так много сил тратится в ходе реализации традиционной технологии захоронения, у А.В. Ильина сводится к сравнению ничтожной скорости миграции плутония в морских илах и потенциально огромной мощности илов в искусственном оползне. Для обоснования безопасности предлагается провести моделирование оползня в лабораторных условиях, основанное на изучении реального участка дна. “Такая предварительная подготовка обеспечит успех беспрецедентной операции по захоронению РАО...” [2, с. 13]. Очевидно, что идея, пропагандируемая А.В. Ильиным, имеет еще большие научные и технические проблемы в реализации и еще меньше отвечает принципам безопасности, чем захоронение на абиссальных равнинах, рассмотренное выше. Так, например, выполнение прогноза рассеивания радиоактивности вокруг могильника столкнется с невозможностью осуществить достоверный прогноз пространственного положения и деформаций канистр с РАО после схода оползня из-за сути самого этого явления. Оползень хаотически перемешивает осадки, находившиеся на дне (и канистры в них), с принесенными илами.

Тем не менее, А.В. Ильин полон оптимизма в отношении своего оригинального и “единственно реального” решения проблемы захоронения РАО, наметил обширную программу исследований, реализация и финансирование которых, по его мнению,

должны осуществляться в рамках международного сотрудничества, к которому он призывает “известных морских геологов”.

В заключение следует отметить, что в 1972 г. была подписана Лондонская конвенция, запрещающая сброс радиоактивных и ядовитых химических отходов на дно морей и океанов. В 1993 г. запрещен сброс в моря жидких РАО. Этот политический шаг был вызван осознанием конечности объема Мирового океана и подкреплен фактом реального глобального загрязнения биосферы радионуклидами в результате испытаний ядерного оружия в атмосфере, которая тоже казалась безграничной. После Лондонской конвенции рассмотрение предложений о подводном захоронении стало юридически бессмысленным, а получение финансирования проблематичным, по крайней мере, в обозримом будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ильин А.В.* О геоморфологическом аспекте захоронения радиоактивных отходов на дне океана (Ст. 1. Анализ существующих подходов и способов захоронения РАО) // Геоморфология. 2007. № 3. С. 3–13.
2. *Ильин А.В.* О геоморфологическом аспекте захоронения радиоактивных отходов на дне океана (Ст. 2. Основы новой технологии захоронения РАО) // Геоморфология. 2008. № 1. С. 3–15.
3. *Shephard L.E., Buckley D.E., Cranston R.E. et al.* Site selection for nuclear waste disposal within deep-sea sediments // The geological disposal of high-level radioactive wastes. Athens: Theophrastus Publ., 1987. P. 589–606.

ИГЕМ РАН

Поступила в редакцию
19.05.2008