

## **ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ СИГНАТУРЫ И СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ГИПОТЕТИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ОХЛАЖДЕНИЕМ ПОДЗЕМНЫМ ИСТОЧНИКОМ**

**Лэнс К. Ким, Райнер Юнгвирт, Гвидо Ренда,  
Эрик Вольфарт и Джакомо Дж. М. Кояцци**

### **АННОТАЦИЯ**

В данном предварительном исследовании рассматривается осуществимость охлаждения небольшого ядерного реактора (с тепловой мощностью в десятки мегаватт) двумя скважинами, которые забирают подземные воды и инжектируют нагретую жидкость под землю. Связанные с такой системой сигнатуры существенно отличаются от сигнатур обычных систем охлаждения. Вместо султана пара или вытекания нагретой воды на площадке без доступа к поверхностным водам могут наблюдаться только устья скважин. Другими потенциальными сигнатурами будут поверхностные тепловые аномалии, геоморфологические изменения, наведенная сейсмичность, и измененная химия подземных вод. Поскольку эти сигнатуры могут быть слабыми и запаздывающими по отношению к действиям на реакторе, понимание операционных принципов системы и индикаторов гидрогеологических условий, способствующих потоку подземных вод, становятся более критичными для обнаружения такого реактора методами дистанционного зондирования.

Лэнс К. Ким, Райнер Юнгвирт, Гвидо Ренда, Эрик Вольфарт и Джакомо Дж. М. Кояцци работают в Объединенном исследовательском центре Европейской комиссии, Испра, Италия.

Почтовый адрес для корреспонденций: Lance K. Kim, Southern Research, 757 Tom Martin Drive, Birmingham, AL 35211, USA.

Адрес электронной почты: [lkim@southernresearch.org](mailto:lkim@southernresearch.org)

Статья получена 4 ноября 2015 года и принята к публикации 28 марта 2016 года.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Аналитики нераспространения при оценке подозрительной площадки ядерного реактора нередко ищут сигнатуры системы охлаждения<sup>1</sup>. Поскольку большая часть систем реактора скрыта внутри строений, компоненты охлаждающего контура, непосредственно связанные с конечным стоком тепла, часто наиболее открыты для наблюдений. Вздвигающиеся клубы пара из градирен с естественной тягой и потоки нагретой воды, выливающиеся в соседние открытые водоемы, – это часто появляющиеся символические образы атомной энергетики. Другую возможность представляют сухие системы охлаждения, но они редко используются на атомных электростанциях из-за их малой эффективности и высокой стоимости, и они обычно легко отождествляются по своим размерам и тепловой сигнатуре (смотрите рисунок 1)<sup>2</sup>.

Чтобы избежать обнаружения, можно попытаться подавить сигнатуры системы охлаждения реактора. Пример подавления тепловой сигнатуры можно найти в истории ранней советской атомной программы. В письме к Лаврентию Берии Игорь Курчатов убеждает расположить комплекс производства плутония «Маяк» рядом с озером для охлаждения, вместо того, чтобы использовать градирни: «Образующийся пар [из градирен], который неизбежно будет возникать в больших количествах (в особенности зимой), будет таким образом нарушать маскировку ...»<sup>3</sup>. Хотя такое ухищрение сегодня менее эффективно, разбавление в больших потоках воды или воздуха может скрыть тепловые сигнатуры от телевизионных камер видимого и теплового инфракрасного диапазонов<sup>4</sup>.

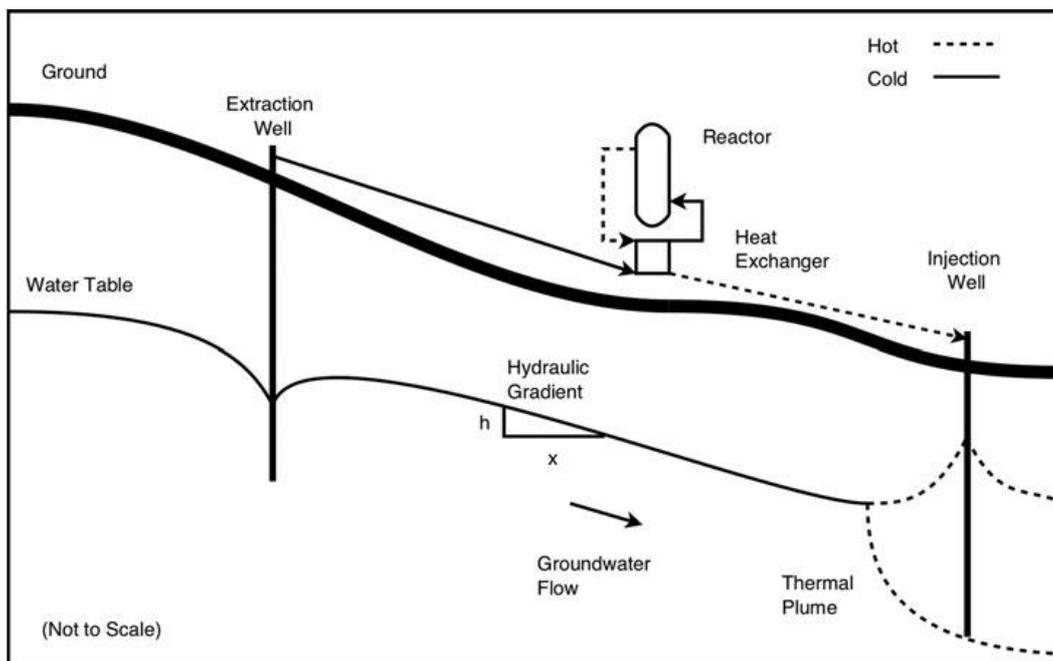


**Рисунок 1.** Примеры систем охлаждения и конечных стоков тепла: клубы пара из градирни (вверху слева)<sup>5</sup>; та же самая площадка после сноса градирни, строительства нового реактора, и возможного сброса охлаждающей воды (вверху справа)<sup>6</sup>; изображение в инфракрасном диапазоне реактора атомной электростанции и его бассейна для охлаждения воды (внизу слева)<sup>7</sup>; электростанция Матимба, угольная электростанция с мощностью 4 ГВт(эл.) – самая крупная в мире электростанция с прямым воздушным охлаждением (внизу справа). Пояснения авторов на рисунках (из левого верхнего угла против часовой стрелки): 1 – здание реактора, 2 – градирня с видимым клубом пара, 3 – река (вверху слева); 1 – здание реактора, 2 – новое здание реактора, градирня снесена, 3 – река, 4 – новый сброс охлаждающей воды (вверху справа); 1 – реактор, 2 – тепловой султан, 3 – бассейн охлаждения (внизу слева); 1 – конденсаторы с воздушным охлаждением (внизу справа).

Еще одну возможность можно найти под землей. На озеро Курчатова и на другие поверхностные источники пресной воды приходится только 0,3 процента от земных ресурсов незамерзшей пресной воды. Почти все эти ресурсы – это подземные воды в пористых песчаных разломах почвы и скального грунта, и они тысячелетиями удовлетворяли потребности человека<sup>9</sup>. Сегодня относящиеся к энергетике применения подземных вод включают производство геотермальной энергии, хранение тепловой энергии, охлаждение и нагрев. Например, в некоторых засушливых районах Соединенных Штатов, подземные воды представляют существенный источник воды для охлаждения электростанций<sup>10</sup>.

При отводе подземных вод термические и визуальные сигнатуры системы охлаждения из подземного источника будут существенно отличаться от сигнатур обычных систем охлаждения реактора. Как показано на рисунке 2, пара скважин будет извлекать подземные воды из водоносного горизонта для охлаждения реактора и впоследствии закачивать нагретую воду под поверхность. Затем поток подземных вод будет уводить тепловой факел от откачивающей скважины, рассеивая тепловую энергию под землей<sup>11</sup>. Хотя реактор, охлаждаемый подземным источником, может показаться аналитикам нераспространенным беспрецедентным и незнакомым, его разработка может быть сведена к установке связи между двумя общепризнанными технологиями: ядерными реакторами и водозаборными скважинами. В предшествующем исследова-

нии предполагалось, что охлаждение крупных электростанций таким способом может быть «... экономически осуществимым, в особенности в засушливых районах...» благодаря уменьшению потерь на испарение воды и возвращению накопленной энергии для промышленного или сельскохозяйственного применения<sup>12</sup>.



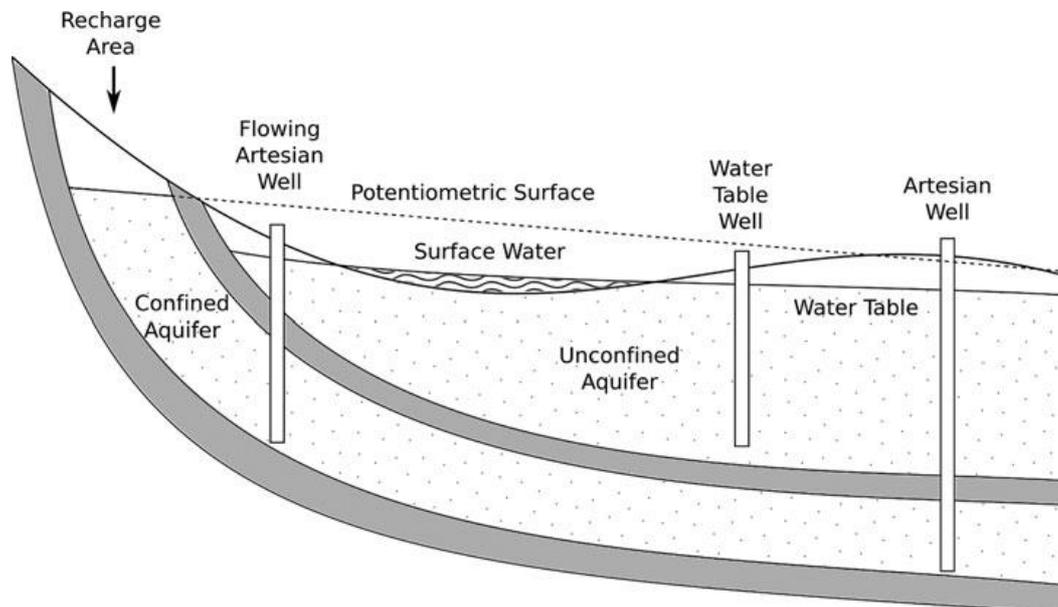
**Рисунок 2.** Концептуальная схема ядерного реактора, охлаждаемого подземным источником и гидравлическим уклоном, движущим поток воды. Течение холодной воды представлено сплошными линиями, горячей воды – пунктирными линиями. Надписи на рисунке (слева направо и сверху вниз): 1 – поверхность земли; 2 – откачивающая скважина; 3 – реактор; 4 – теплообменник; 5 – закачивающая скважина; 6 – уровень грунтовых вод; 7 – гидравлический уклон; 8 – поток подземных вод; 9 – тепловой факел.

Для того, чтобы изучить последствия охлаждения подземным источником с точки зрения ядерного нераспространения, в данном исследовании рассматривается осуществимость гипотетического реактора, охлаждаемого подземным источником, и, вслед за этим, отождествляются потенциальные сигнатуры и средства обнаружения такой системы. Сначала развивается предварительное понимание систем водоносного горизонта и температуры подземных вод. Затем исследуются эксплуатационные принципы пары скважин посредством параметрической оценки минимального разнесения пары скважин, необходимого для предотвращения теплового прорыва. Затем исследуется конструкция скважин подачи воды и закачивания для оценки достаточности и надежности потока охлаждающей воды, и для идентификации особенностей, относящихся к их обнаружению. И, наконец, посредством проведения литературного обзора дистанционного зондирования подземных вод и геотермальных резервуаров отождествляются дополнительные потенциальные сигнатуры. Для заинтересованных читателей в приложениях содержатся оценки опорожнения эксплуатационной скважины и требований к мощности насосов (сетевое приложение А), обзор аналогичных пар скважин на геотермальных электростанциях (сетевое приложение В), оценку требований к аварийному охлаждению активной зоны (сетевое приложение С), оценку пространственного протяжения теплового факела (сетевое приложение D), и обсуждение энергетического баланса поверхности с оценкой температуры поверхности земли с подземным источником тепла (сетевое приложение E)<sup>13</sup>.

## ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ И ВОДОНОСНЫЕ ГОРИЗОНТЫ

В отличие от образа поверхностных вод, знакомого аналитикам нераспространения, водоносные горизонты – это геологические формации с содержащими воду пустотами, обеспечивающими экономичное извлечение грунтовых вод. Водный баланс водоносного горизонта определяется подпитывающим притоком (например, атмосферными осадками и тающим снегом), сохранением в водоносном горизонте, и вытекающих потоков (например, скважин, родников, ручьев). Водоносные горизонты можно грубо классифицировать

по структуре: свободные и замкнутые. В свободные водоносные горизонты вода просачивается непосредственно с поверхности, а пути потоков воды, подпитывающих замкнутые горизонты, ограничиваются слоями пород с низкой проницаемостью (смотрите рисунок 3)<sup>14</sup>.



**Рисунок 3.** Схема открытых и замкнутых водоносных горизонтов. Адаптировано из работы<sup>14</sup>. Надписи на рисунке (слева направо и сверху вниз): 1 – зона подпитки; 2 – переливающаяся артезианская скважина; 3 – потенциметрическая поверхность; 4 – скважина на уровне грунтовых вод; 5 – артезианская скважина; 6 – поверхностные воды; 7 – уровень грунтовых вод; 8 – замкнутый водоносный горизонт; 9 – свободный водоносный горизонт.

В водоносном горизонте подземные воды текут сквозь поры и трещины под воздействием так называемого гидравлического градиента (уклона). Поток сквозь «твердую губку» пористой геологической среды описывается законом Дарси, в котором поток подземных вод  $q$  под воздействием гидравлического уклона,  $\nabla h$  или  $l$  (смотрите рисунок 2) через геологическую среду с гидравлической проводимостью  $K$  определяется соотношением

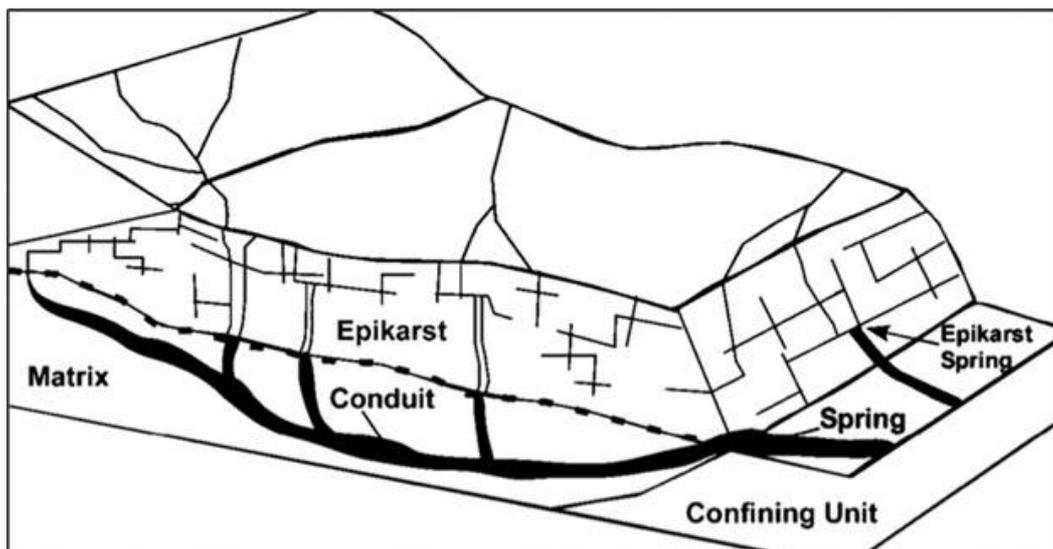
$$q = -K\nabla h = Kl \quad (1)$$

Средняя скорость воды  $v$  при течении через геологическую среду с пористостью  $\phi$  связана с потоком подземных вод соотношением<sup>15</sup>:

$$v = q / \phi \quad (2)$$

Потоки в средах, где доминируют трещины, труднее охарактеризовать, чем потоки в пористых средах; это требует детального знания трещин, которые ведут себя подобно сети трубопроводов с соединениями<sup>16</sup>. В некоторых случаях, таких, как водоносные горизонты в карстовом известняке, подводные потоки протекают через большие упрочненные растворением каналы, напоминающие естественные подземные трубопроводы (смотрите рисунок 4)<sup>17</sup>.

Температура подземных вод меняется с глубиной под влиянием энергетического баланса на поверхности и геотермального градиента. Неглубокие подземные воды, расположенные на глубине 10–25 м под поверхностью, обычно на 1–2 °С теплее, чем средняя температура воздуха, и в ней проявляются суточные и сезонные изменения от распространения тепловой волны через землю. Ниже зоны влияния энергетического баланса на поверхности температура подземных вод увеличивается с геотермальным градиентом со скоростью от примерно 1,8 °С на 100 м в толстых слоях осадочных пород до 3,6 °С на 100 м в районах с недавней вулканической активностью<sup>18</sup>.



**Рисунок 4.** Схема карстового водоносного горизонта с матричным, трещиноватым и канальным путями потоков<sup>17</sup>. Подписи на рисунке (слева направо): 1 – матрица; 2 – канал; 3 – верхний слой карста; 4 – удерживающий блок; 5 – родник; 6 – родник из верхнего слоя карста. ©RyanDoucette. Воспроизведено с разрешения RyanDoucette. Разрешение для повторного использования следует получать от владельца прав.

#### ОХЛАЖДЕНИЕ ОТ ПОДЗЕМНОГО ИСТОЧНИКА

Для того, чтобы использовать водоносный горизонт как конечный сток тепла, система охлаждения от подземного источника, схематически показанная на рисунке 2, откачивает воду через откачивающую скважину, и возвращает нагретую воду под поверхность через закачивающую скважину. Вокруг закачивающей скважины формируются подповерхностные гидродинамические и тепловые фронты, причем тепловой фронт запаздывает, обычно распространяясь в три–пять раз медленнее, по мере того, как контакт с геологической матрицей охлаждает гидродинамический фронт<sup>19</sup>.

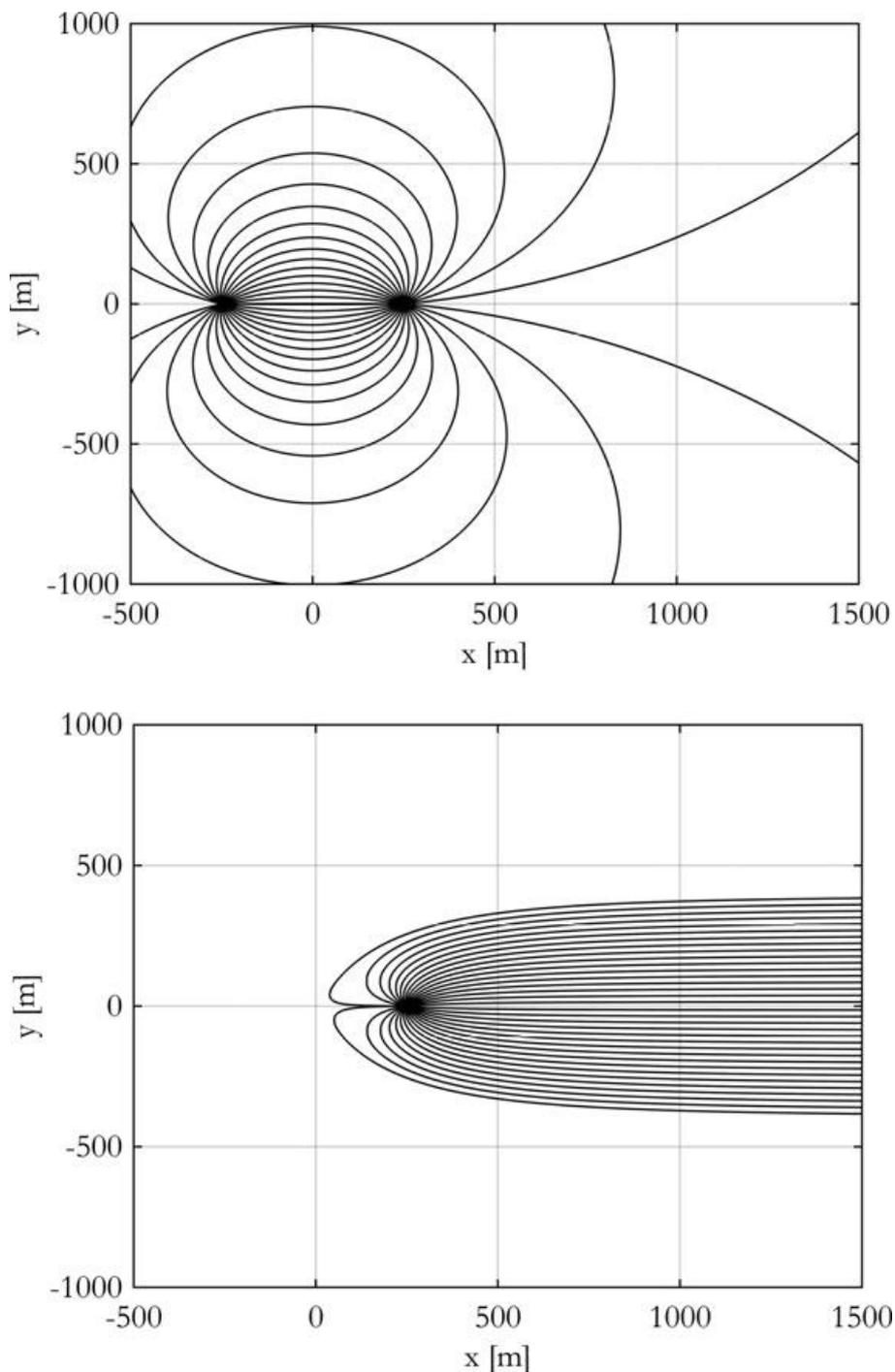
Тепловой прорыв является ограничивающим фактором в проектировании и эксплуатации системы охлаждения с подземным источником. Увеличение температуры воды от миграции теплового фронта к откачивающей скважине уменьшает эффективность охлаждения. Расположение закачивающей скважины на достаточном расстоянии вниз по потоку от откачивающей скважины уменьшает риск теплового прорыва за счет переноса теплового факела вниз по гидравлическому уклону. Как показано на рисунке 5 с результатами применения программы «Симулятор тепловой рециркуляции» (Thermal Recycling Simulator – открытый доступный код для моделирования тепловой рециркуляции между скважинами), поток подземных вод подавляет рециркуляцию закачиваемого потока в откачивающую скважину<sup>20</sup>.

Минимальное разнесение скважин  $L$  для ограничения риска прорыва в условиях потока через поры зависит от объемного расхода воды при закачивании (предполагаемого равным объемной скорости откачивания)  $V$  и свойств водоносного горизонта (толщины  $b$ , гидравлической проводимости  $K$  и гидравлического уклона  $I$ ); оно может быть оценено по формуле

$$L > (2V') / (\pi b K I) \quad (3)$$

Объемный расход воды  $V$  определяется тепловой мощностью реактора  $Q'$ , повышением температуры в паре скважин  $\Delta T$ , и объемной теплоемкостью воды (произведением плотности  $\rho$  и теплоемкости  $C_w$ )<sup>21</sup>:

$$V' = Q' / (\rho C_w \Delta T) \quad (4)$$



**Рисунок 5.** Вид сверху на линии тока в паре скважин, разнесенных на 500 м без регионального потока подземных вод (вверху, гидравлический уклон равен нулю, время до прорыва равно 2,5 года) и с подземным потоком (внизу, гидравлический уклон 0,15) для объемного расхода воды 8 900 м<sup>3</sup>/сутки с подъемом температуры на 70 °С в водоносный горизонт толщиной 50 м с гидравлической проводимостью  $1,74 \cdot 10^{-5}$  м/с, пористостью 0,14 и объемной теплоемкостью скальной породы примерно вдвое меньшей, чем у воды.

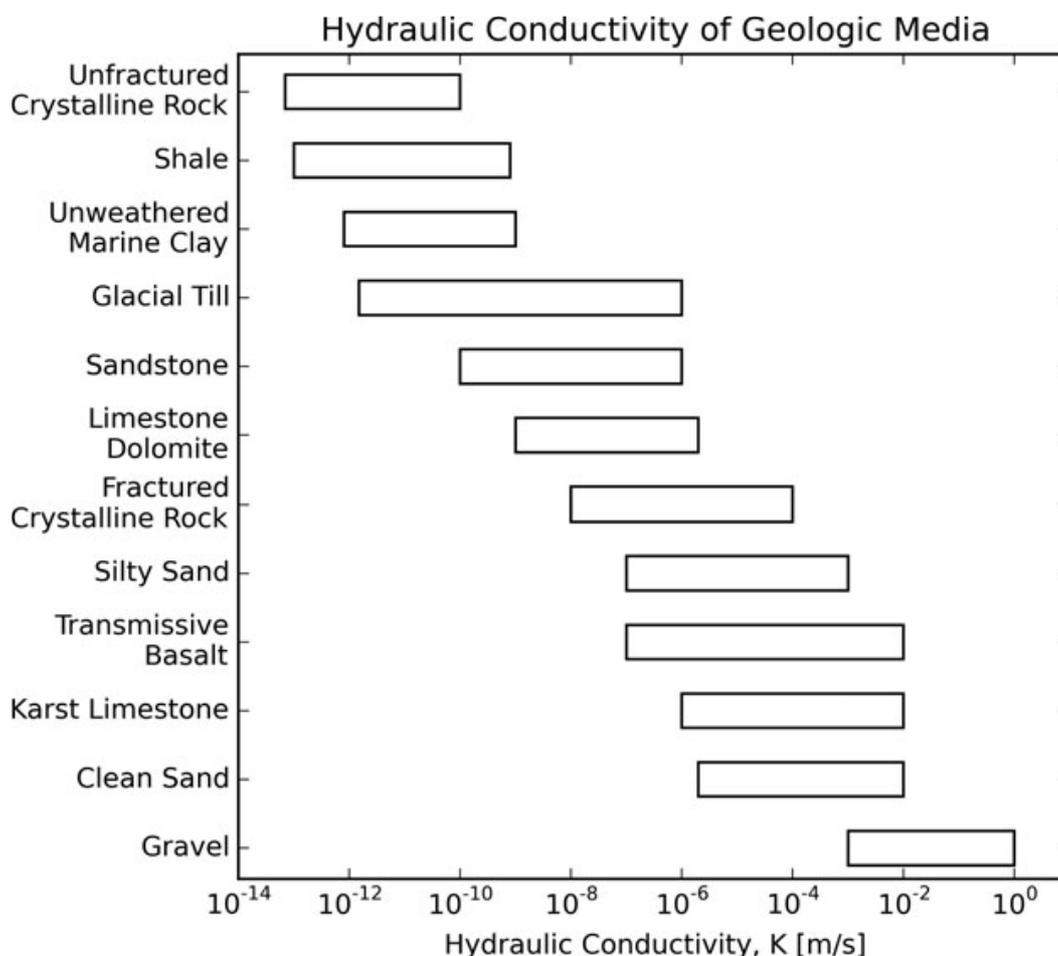
#### Параметрическая оценка разнесения скважин

Была проведена параметрическая оценка минимального разнесения скважин (уравнение (3)) в широком диапазоне термогидравлических и гидрогеологических условий, перечисленных в таблице 1. Тепловая мощность от небольшого ядерного реактора (10 – 30 МВт) полностью передается системе охлаждения в диапазоне подъема температуры в паре скважин. Предполагается, что температура источника подземной

воды равна 20 °С для произвольного местоположения со сравнимой среднегодовой температурой воздуха<sup>22</sup>. Как показано на рисунке 6, гидравлическая проводимость может находиться в диапазоне шириной в несколько порядков величины, и изменяться в зависимости от типа геологической среды<sup>23</sup>. Представления о гидравлическом уклоне базируются на данных по Юкка Маунтин, предполагаемом хранилище ядерных отходов с тремя гидрологическими районами: один с «большим» гидравлическим уклоном в 0,15, или более, что может совпадать с глубоким карбонатным водоносным горизонтом, второй с «умеренным» уклоном около 0,015, и третий с «очень малым» уклоном в 0,0001<sup>24</sup>. Толщина горизонта в 50 м основана на предыдущем исследовании охлаждения с подземным источником<sup>25</sup>.

**Таблица 1.** Значения термогидравлических и гидрогеологических параметров.

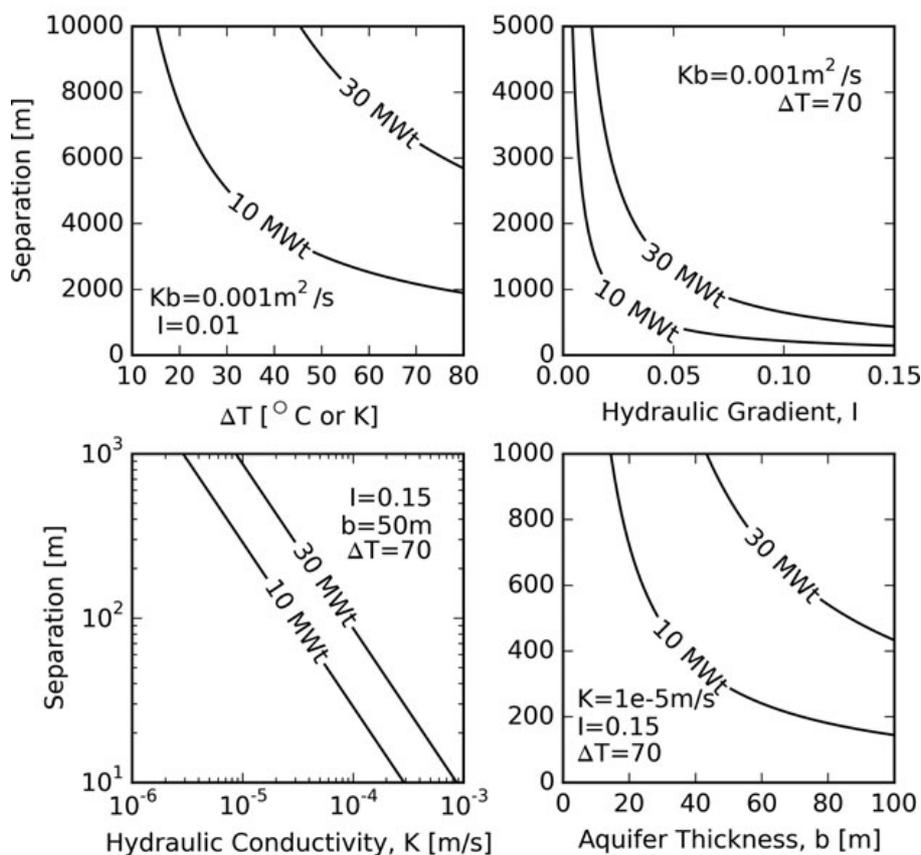
Категория	Параметр	Значение
Термогидравлическая	Тепловая мощность реактора Q (МВт)	10 – 30
	Повышение температуры $\Delta T$ (°С)	10 – 80
	Теплоемкость охлаждающей воды $C_{wv}$ (кДж/кг·К)	4,2
	Плотность охлаждающей воды $\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	1 000
Гидрогеологическая	Толщина горизонта b (м)	1 – 50
	Гидравлическая проводимость K (м/с)	$10^{-13}$ – $10^{-2}$
	Гидравлический уклон I	0,01 – 0,15
	Температура подземной воды (°С)	20



**Рисунок 6.** Значения гидравлической проводимости геологических сред. Адаптировано из работы<sup>30</sup>. По горизонтальной оси отложены значения гидравлической проводимости K в м/с. На вертикальной оси приведены названия геологических сред: 1 – сплошная кристаллическая порода; 2 – сланцевая глина; 3 – не выветренная морская глина; 4 – ледниковая валунная глина; 5 – песчаник; 6 – известняк, доломит; 7 – трещиноватая кристаллическая порода; 8 – наносный песок; 9 – трансмиссивный базальт; 10 – карстовый известняк; 11 – чистый песок; 12 – гравий.

Поскольку тепловое загрязнение в относительно безжизненном водоносном горизонте в основном останется без последствий, более высокие температуры закачиваемой воды могут понизить поток охлаждающей воды до пределов мощности большой муниципальной или сельскохозяйственной эксплуатационной водяной скважины. Увеличение подъема температуры в паре скважин от 10 °С до 70 °С (что соответствует температуре закачки в 90 °С) приведет к семикратному уменьшению потока охлаждающей воды от 62 000 м<sup>3</sup>/сутки до 6 900 м<sup>3</sup>/сутки для реактора с тепловой мощностью в 30 МВт(тепл.) (уравнение (4) и таблица 1) – что находится в пределах производительности одиночной эксплуатационной водяной скважины с диаметром приблизительно 0,5 м<sup>26</sup>. При таких условиях реактор мощностью 30 МВт(тепл.), производящий 1 г плутония на МВт·сутки тепловой энергии, изготовит существенное количество (8 кг) плутония примерно за 270 суток и закачает в процессе примерно 2,4·10<sup>6</sup> м<sup>3</sup> охлаждающей воды<sup>27</sup>. Дальнейшее увеличение температуры закачки еще более сократит требования к откачивающей скважине, но двухфазный поток усложнит закачку и усилит тепловые сигнатуры<sup>28</sup>.

### Minimum Doublet Separation



**Рисунок 7.** Минимальное разнесение скважин для различных термогидравлических и гидрогеологических условий. По вертикальной оси всех графиков отложено разнесение скважин. На верхнем левом рисунке по горизонтальной оси отложена разность температур, на верхнем правом рисунке – гидравлический уклон, на нижнем левом рисунке – гидравлическая проводимость, и на нижнем правом рисунке – толщина водоносного горизонта.

В типичных горизонтах может потребоваться большое разнесение скважин, но более толстые горизонты с более быстрым потоком подземных вод смогут позволить использовать более тесно расположенные скважины. В «гидрогеологически типичном» горизонте ( $K_b = 0,001 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $l = 0,01$ ) для обслуживания реактора мощностью 30 МВт(тепл.) с подъемом температуры на 70 °С потребуются большие разнесения приблизительно на 6,5 км (рисунок 7, вверху слева, уравнение (3) и (4))<sup>29</sup>. Хотя разнесенные на большие расстояния скважины будет не так легко отождествить с удаленным реактором, компактная конфигурация может быть более практичной. В таком случае расстояние между скважинами сокращается из-за более крутого гидравлического уклона (рисунок 7, вверху справа), или из-за более высокой гидравлической проводимости

(рисунок 7, внизу слева). Закачка в более толстый горизонт позволяет еще более сократить расстояние между скважинами из-за уменьшения поперечной скорости закачиваемого потока (рисунок 7, внизу справа). Представляется, что осуществим широкий диапазон эксплуатационных режимов; в таблице 2 перечислены минимальные значения гидравлической проводимости для достижения разнесения между скважинами в 500 м при указанных термогидравлических и гидрогеологических параметров. При таких условиях подходящие значения гидравлической проводимости можно будет найти у гравия, песка, карстового известняка, трансмиссивного базальта и трещиноватой кристаллической породы (рисунок 6)<sup>30</sup>.

**Таблица 2.** Минимальная гидравлическая проводимость для достижения расстояния между скважинами в 500 м.

Категория	Параметр	Значение
Термогидравлическая	Тепловая мощность реактора Q (МВт)	10 – 30
	Повышение температуры $\Delta T$ (°C)	70
	Поток охлаждающей воды $C_W$ (м <sup>3</sup> /сутки)	3000 – 8900
Гидрогеологическая	Толщина горизонта b (м)	50
	Гидравлическая проводимость K (м/с)	$>6 \cdot 10^{-6} - >2 \cdot 10^{-5}$
	Гидравлический уклон I	0,15
	Расстояние между скважинами (м)	500

Можно ожидать, что такие проницаемые основания приведут к появлению проблем при проектировании зданий и сооружений. Например, в развитых формациях карстового известняка возникающие опасности включают неровные поверхности с открытыми полостями, в которых закачка и откачка воды могут обострить риск оседания грунта, поднятия грунта и образования карстовых воронок. Однако, во многих карстовых формациях подавляющее большинство площади (более 95 процентов) будет приходиться на прочную скальную породу с безопасной несущей прочностью в 2 – 4 мегапаскаля (МПа). Строительная практика на таких площадках включает подробное определение характеристик подповерхностного слоя с помощью геофизических методов для поиска мест, предрасположенных к обвалу, контролированию отвода воды и распределение строительных нагрузок (например, опорными или фундаментными плитами)<sup>31</sup>.

При условии приемлемости этих строительных рисков полученные результаты позволяют предположить, что уменьшение разнесения скважин для охлаждения реактора до практических расстояний осуществимо. Если тепловой прорыв все-таки возникнет, то подъем температуры охлаждающей воды может в конце концов привести к остановке реактора и прерывистой эксплуатации<sup>32</sup>. Перерыве в работе реактора для перезагрузки можно будет синхронизировать с тепловыми прорывами, возобновляя операции после того, как тепловой факел переместится вниз по уклону. Наряду с тем, что поток через трещины может привести к преждевременному прорыву, закачка в гидрологически отдельный слой горизонта (например, ниже слоя горизонта с низкой проницаемостью), или же в упрочненный за счет растворения канал, отводящий поток от откачивающей скважины (рисунок 4), сделает прорыв маловероятным<sup>33</sup>.

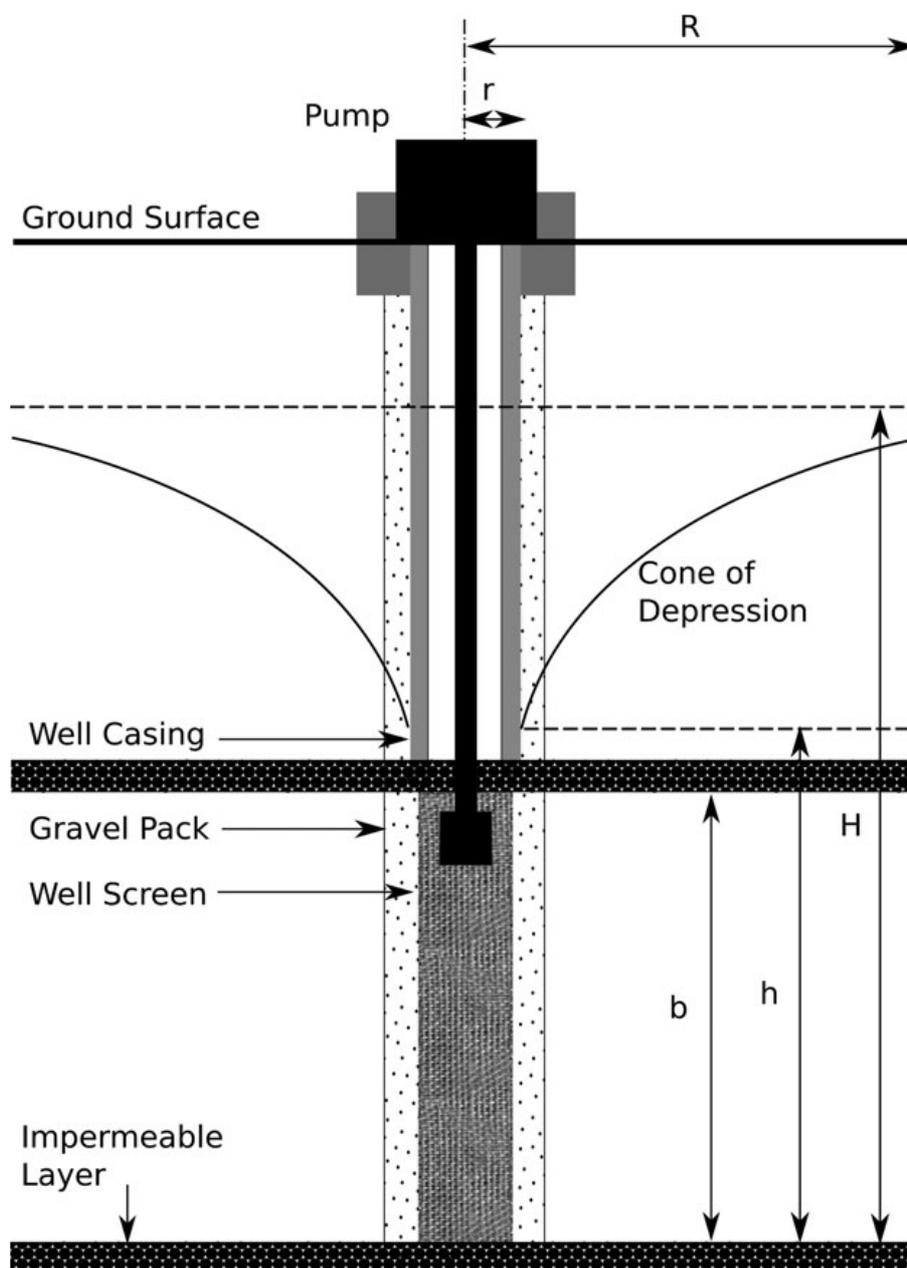
## ОТКАЧИВАЮЩАЯ И ЗАКАЧИВАЮЩАЯ СКВАЖИНЫ

Откачивающая и закачивающая скважины важны как для надежной эксплуатации, так и для отличия системы охлаждения с подземным источником от обычных систем охлаждения. Событие потери теплового отвода, вызванное неисправностью откачивающей скважины, не только прервет производство плутония, но и потенциально приведет к повреждению активной зоны и выбросу обнаружимых радионуклидов в окружающую среду. После неисправности закачивающей скважины эксплуатация может быть приостановлена, и, вероятно, она будет сопровождаться проливом видимых потоков воды на поверхность.

### Откачивающие скважины

Сигнатуры откачивающих скважин зависят от их физической конструкции и гидрогеологической обстановки. Основными компонентами типичной буровой откачивающей скважины являются обсадная труба скважины, узел фильтров, экран скважины и насос. Обсадная труба скважины служит главным каналом для воды и местом размещения насоса. Подземные воды поступают в обсадную трубу через узел фильтров и перфорированные экраны скважины, которые ограничивают доступ твердых частиц в скважину. Вокруг откачивающей воду скважины образуется конус пониженного уровня воды, устанавливающий гидравлический

уклон, который направляет поток подземных вод вовнутрь в радиальном направлении. Пересыхание скважины может произойти во время засухи, или от излишней откачки, когда депрессия (разница между статическим уровнем воды  $H$  и уровнем откачиваемой воды  $h$ ) понизится до уровня входного отверстия насоса (смотрите рисунок 8)<sup>34</sup>.



**Рисунок 8.** Поперечное сечение буровой откачивающей водяной скважины и конуса депрессии уровня воды над замкнутым водоносным горизонтом. Адаптировано из работы<sup>34</sup>. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – насос; 2 – земная поверхность; 3 – конус депрессии; 4 – обсадная труба; 5 – гравийный фильтр; 6 – непроницаемый слой.

Видимые характеристики скважины, в частности, след устья скважины, определяются производительностью скважины и размером насоса. Размер скважины определяется размещением насоса и ограничением потери потока на трение при прохождении экрана скважины (скорость входа в экран менее 0,03 м/с) и при движении вверх по обсадной трубе (скорость вверх по стволу скважины менее 1,5 м/с). Применяя эти ограничения, можно показать, что скважина, способная произвести 8 900 м<sup>3</sup>/сутки (что достаточно для реактора мощностью 30 МВт(тепл.) при повышении температуры на 70 °С) должна будет иметь минимальный диаметр в диапазоне 0,36 – 0,51 м<sup>35</sup>.

Можно также будет наблюдать строительство скважины и ее периодическую перестройку для повышения и поддержания производительности скважины. При исправлении ущерба водоносному горизонту от бурения будут применяться такие методы, как усиленная откачка, обратная промывка, механические пульсации, воздушные пульсации, промывка струями воды или продувка потоками воздуха. Для увеличения проницаемости для потока могут применяться такие методы стимуляции горизонта, как обработка кислотным раствором, взрывами, или гидравлическим разрывом. Периодическая реконструкция скважины физическими и химическими методами (например, обработка кислотным раствором, механическая очистка, облучение) обращает действие таких механизмов деградации, как накопление мелких частиц, химическое образование накипи, и биообрастание, которые забивают устье скважины; последний механизм может быстро привести к неисправности скважины, если экспоненциальный рост бактерий останется незамеченным<sup>36</sup>.

Скорее всего, откачивающие скважины будут располагаться в водоносных горизонтах с предпочтительными гидрогеологическими условиями для того, чтобы уменьшить расходы на бурение и мощность насоса. Например, для преодоления депрессии подземных вод в несколько километров (пренебрегая подъемом по вертикали и потерями на трение в трубопроводе) в горизонте с низкой проницаемостью ( $10^{-6}$  м/с) для охлаждения реактора мощностью 30 МВт(тепл.) в течение 270 суток потребуется несколько мегаватт механической мощности насосов, и, возможно, для поддержки необходимого потока потребуется несколько скважин. Напротив, в горизонте с высокой проницаемостью ( $10^{-4}$  м/с) может потребоваться только несколько десятков киловатт для преодоления депрессии в несколько десятков метров. Более глубокие уровни подземных вод потребуют дополнительной мощности насосов для того, чтобы преодолеть вертикальный подъем над статическим уровнем воды (смотрите сетевое Приложение А).

Для подпитки водоносного горизонта и предотвращения пересыхания скважины может потребоваться достаточное орошение<sup>37</sup>. Хотя общий баланс водоносного горизонта не нарушается при работе пары скважин, возвращающей откачиваемую жидкость, может возникнуть локализованная избыточная откачка, если поток воды из зон захвата скважины к экранам скважины не сможет адекватно сбалансировать откачку<sup>38</sup>. В качестве примера зоны захвата скважины, сбалансирование потока, необходимого реактору мощностью 30 МВт(тепл.), потребует 500 мм ежегодного орошения зоны захвата площадью 6,5 км<sup>2</sup>, или 2,2 км<sup>2</sup> для реактора мощностью 10 МВт(тепл.), при условии полного проникновения и захвата откачивающей скважиной. Земная поверхность с крутым уклоном уменьшает потоки подпитки, но природные и искусственные предпочтительные пути потоков (например, депрессии, трещины, отводы, площадки распределения воды, ямы, шахты, плотины) способствуют проникновению воды в подповерхностные слои<sup>39</sup>.

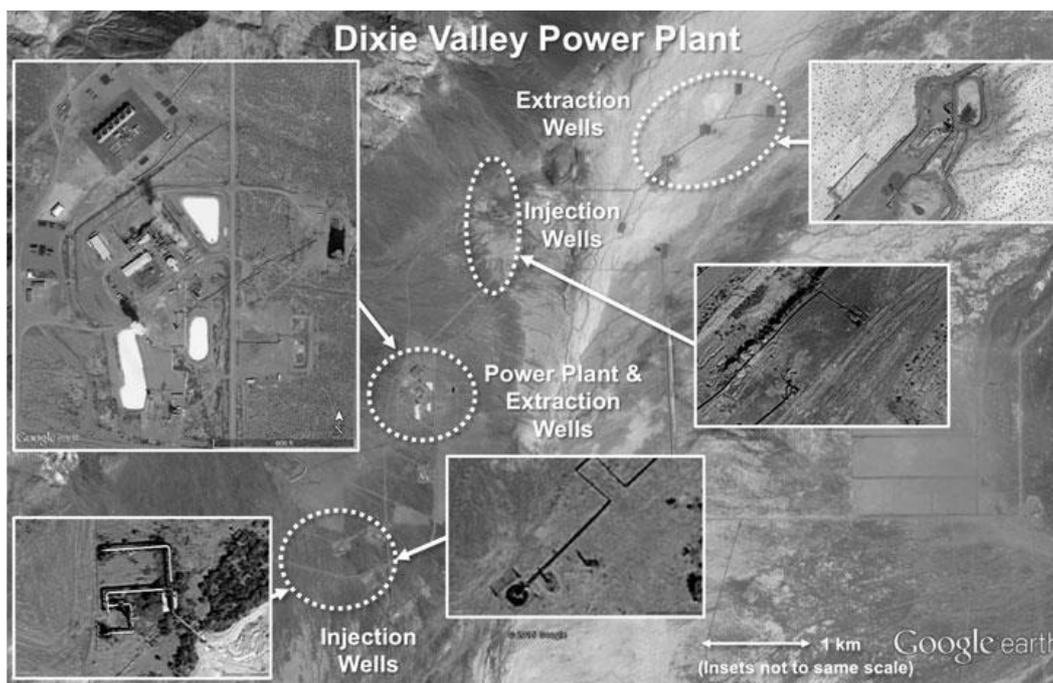
### **Закачивающие скважины**

Закачивающие скважины во многом похожи на откачивающие скважины, но они сталкиваются с проблемами дополнительных тепловых требований и обслуживания. Диапазон конструкций закачивающих скважин широк, от простых открытых буровых скважин до скважин с экранами. В отличие от откачивающих скважин, обсадные трубы, цементные материалы, и уплотняющие устройства закачивающих скважин должны выдерживать повышенные тепловые и коррозионные нагрузки для того, чтобы предотвратить растрескивание обсадных труб, вытягивание и выпучивание<sup>40</sup>. Кроме того, в отличие от откачивающих скважин, где мелкие частицы при откачке непрерывно удаляются, закачивающие скважины менее надежны в защите от накопления мелких частиц и других процессов, забивающих скважину (например, выпадения кремнистых и кальцитовых осадков, увлечения газовых пузырьков, осаждения растворенных твердых веществ и размножения бактерий). В закачивающих скважинах часто устанавливают более длинные экраны по сравнению с откачивающими скважинами (обычно вдвое более длинными) для уменьшения интервалов для обслуживания<sup>41</sup>. Если давления инъекции превысят пределы для одиночной скважины, то может потребоваться установка нескольких скважин.

Несмотря на эти трудности, закачивающие скважины используются во многих промышленных процессах для закачки горячих жидкостей (например, при добыче нефти и газа с использованием гидравлических разрывов пласта, экологическим исправлением почвы и водоносных горизонтов инъекцией пара, экстракцией серы в процессе Фраша, обратной закачки выплеснутой воды на геотермальных электростанциях, и т.п.). Например, мощность парогенераторов, используемых в добыче нефти и газа, лежит в диапазоне 3 – 53 МВт(тепл.), и они подают пар в сеть скважин для закачки пара, работающих при температуре до 370 °С. Закачка сбросной воды в производстве геотермальной электроэнергии очень похожа на охлаждение реактора. Скорость закачки меняется в широких пределах в зависимости от типа завода и характеристик геотермального источника. Например, геотермальная электростанция, питающаяся от источника с температурой

200 – 300 °С закачивает 430 – 1700 тонн/сутки сбросных вод с температурой 100 – 200 °С на каждый мегаватт электрической мощности (смотрите рисунок 9 и сетевое приложение В)<sup>42</sup>.

Эти промышленные применения позволяют предположить осуществимость использования пары скважин как конечного теплового отвода. Хотя проблемы надежности скважин могут усложнить эксплуатацию, при проектировании некоторых атомных электростанций рассматривалось применение подземных вод в аварийных ситуациях и для водяного охлаждения<sup>43</sup>. Несколько скважин или аварийная система охлаждения активной зоны компенсировали недостатки в надежности откачивающих скважин. Закачка в подповерхностные слои также кажется осуществимой на основании схожести на скважины, используемые на геотермальных электростанциях для утилизации сбросных вод.



**Рисунок 9.** Геотермальная электростанция Дикси Вэлли (Невада, Соединенные Штаты)<sup>44</sup>. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – электростанция Дикси Вэлли; 2 – откачивающие скважины; 3 – закачивающие скважины; 4 – электростанция и откачивающие скважины; 5 – закачивающие скважины.

## ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ СИГНАТУРЫ И СРЕДСТВА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Сигнатуры, ассоциируемые с системой охлаждения от подземного источника, могут быть весьма отличающимися и менее очевидными, чем сигнатуры обычных систем охлаждения, но они не отсутствуют полностью. Потенциальные визуальные, тепловые, сейсмические, химические и радиологические сигнатуры идентифицировались по обзору литературы по дистанционному зондированию подземных вод и геотермальных ресурсов. Обсуждались также методы подавления потенциальных сигнатур для выявления сигнатур, устойчивых к действию нарушителя (смотрите таблицу 3). В комбинации с сигнатурами гипотетического реактора, знание потенциальных сигнатур и методов подавления, связанных с охлаждением от подземного источника, поможет обнаружению и уменьшит ошибки, вносящие вклад в неверную идентификацию.

### Визуальные

Наблюдаемые сверху визуальные сигнатуры системы охлаждения с подземным источником могут не быть очевидными, и тщательно спланированные усилия по камуфляжу и маскировке могут сделать их еще менее заметными. Деятельность по доступу к устью скважины (например, бурение, новое строительство и обслуживание) может быть заметным и может привести к проливу жидкости на поверхность<sup>45</sup>. Доказательства наличия источников электропитания и резервных источников (например, линий электропередачи, аккумуляторных батарей, дизельных генераторов), необходимых для насосов и других вспомогательных систем

также могут оказаться заметными. Авария с потерей отвода тепла, начавшаяся с неисправности откачивающей скважины, может привести к появлению тепловых сигнатур над земной поверхностью, таких, как факелы пара от аварийного закипания охлаждающей воды (смотрите сетевое Приложение С). Неисправность закачивающей скважины или утечки через трещины на поверхности могут привести к выбросам воды над землей<sup>46</sup>. Тем не менее, многие из этих особенностей (например, скважины или трубопроводы) могут быть спрятаны внутри зданий или в подземных помещениях.

**Таблица 3.** Потенциальные сигнатуры системы охлаждения с подземным источником и потенциальные средства подавления.

Категория	Потенциальные сигнатуры	Потенциальные средства подавления
Визуальная	Строительная деятельность (например, прокладка трубопроводов и бурение скважин)	Камуфляж и маскировка, установка в туннелях
	Электропитание для насосов и другого оборудования для нормальной эксплуатации и аварийных ситуаций	Подземные линии электропитания, ведущие на площадку
	Разработка скважины во время строительных работ и обслуживания	Камуфляж и маскировка, захват жидкостей.
	Непреднамеренные проливы воды	Захват жидкостей
	Геоморфологические изменения (например, провалы и подъемы земли, сточные колодцы, изменившиеся условия влажности)	В зависимости от механизма обнаружения (например, орошение сухих пятен для ограничения влияния на растительность)
	Клубы пара или тепловые сигнатуры от аварийного охлаждения, доставка воды извне площадки	Увеличение охлаждения потоком воздуха, обращение потока от закачивающей скважины
Тепловая	Повышенная температура земной поверхности (например, горячие трубопроводы, закачивающая скважина, тепловой факел)	Увеличение охлаждающего потока, установка изолирующего материала, размещение в покрытых растительностью, дождливых и облачных районах; помехи от близких объектов, глубокая закачка.
	Необычные вариации температуры подземных вод и поверхностной воды	Разбавление подземными водами, длительное время нахождения под поверхностью
Сейсмическая	Повышенная сейсмичность во время и после эксплуатации	Местоположение площадки, оптимизация деятельности по удалению и закачке
Химическая и радиологическая	Утечка продуктов деления в охлаждающую воду во время эксплуатации, пониженная концентрация неконденсируемого газа, активизация химического фронта	Теплообменник без утечки, обработка воды (например, ионообменными смолами), уменьшение температуры инъекции, расстояния до зон закачки

В дополнение к этим техническим особенностям, откачка и закачка жидкости могут привести к геоморфологическим изменениям, обнаружимым при дистанционном зондировании. Получение мультиспектральных изображений, так же, как и измерения с помощью лазеров и радиолокаторов могут выявить провалы поверхности, поднятия поверхности и изменения влажности, указывающие на деятельность по откачке и закачке. Например, интерферометрический радиолокатор с синтезированной апертурой (InSAR) может в сухих условиях измерять высоту поверхности с точностью до 1 мм и обнаруживать деформации поверхности на геотермальных площадках<sup>47</sup>.

### Тепловые

Тепловые сигнатуры системы охлаждения с подземным источником могут оказаться незаметными на крупнозернистых снимках, получаемых на спутниковых формирователях изображений в тепловом инфракрасном диапазоне (смотрите рисунок 1). Обнаружимые тепловые аномалии должны быть достаточно горячими или достаточно большими, чтобы их температура превысила температурное разрешение прибора (0,2–1 °C) при пространственном усреднении по полю зрения пиксела (60–120 м)<sup>48</sup>. Едва различимые тепловые сигнатуры с размерами меньше пиксела могут затеряться на фоне ближайших объектов (например, дорог или зданий), помех от дождя, растительности и облачного покрова, и ложных тепловых аномалий (например, дифференциального солнечного нагрева из-за переменной топографии и теплофизических свойств поверхности)<sup>49</sup>.

Потенциальными целями для тепловидения будут нагретые зоны вокруг закачивающей скважины, горячие закопанные трубопроводы и подземный тепловой факел. Неглубокое захоронение позволяет обнаруживать эти тепловые источники, в особенности ночью, когда пропадают нерегулярные профили от дневного солнечного освещения, и, возможно, зимой, от видоизменяющего снежного покрова. Устье закачивающей

скважины может быть наиболее концентрированной тепловой сигнатурой – если только оно не будет термически развязано от поверхности установкой изолирующей вставки в стволе скважины над его активной секцией. Аналогично, глубокое захоронение и изоляция с высоким тепловым сопротивлением может значительно уменьшить поток тепла от трубопровода к поверхности<sup>50</sup>.

В отличие от этих локализованных тепловых источников, подповерхностный тепловой факел будет, вероятно, самой большой термически затронутой областью, и его будет не так легко изолировать. Если подземный поток отсутствует, то закачка  $2,4 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> нагретой воды (это соответствует одному существенному количеству плутония на реакторе мощностью 30 МВт) в толстый пористый известняковый водоносный горизонт приведет к созданию цилиндрической зоны диаметром 660 м с перемещенной водой и зоны с измененной температурой диаметром 330 м (смотрите сетевое приложение D). Реальный факел будет вытянут в направлении подземного потока (смотрите рисунок 5) и он будет зависеть от геометрии горизонта и природы потока (например, межкристаллитный поток, поток в трещинах, и (или) поток в канале). В присутствии трещин тепловой фронт сначала движется быстро, но потом замедляется по мере того, как площадь поверхности между трещинами и геологической матрицей увеличивается с расстоянием<sup>51</sup>.

Если поверхностные проявления имеют сходство с трудно обнаружимыми не выходящими на поверхность геотермальными ресурсами, то тепловой факел оставит немного наблюдаемых следов. В то время как геотермальные ресурсы часто проявляются как горячие источники, фумаролы и гидротермические изменения поверхности, не выходящие на поверхность геотермические ресурсы остаются под землей в виде глубокого поперечного потока под удерживающим гидрогеологическим пластом. Методы корректировки тепловых инфракрасных изображений для суточного влияния солнечного нагрева, маскирующего геотермические источники (например, ложных тепловым аномалий, связанных с переменной ориентацией склонов, альбедо и тепловой инерцией) оказались полезными для региональных исследований, но мало пригодными для идентификации малозаметных тепловых аномалий<sup>52</sup>. Простая оценка показывает, что несколько метров известняка могут оказаться достаточными, чтобы понизить пиковую температуру на земной поверхности ниже порога обнаружения спутниковых тепловых инфракрасных формирователей изображения (смотрите сетевое приложение E). Исследование сложных особенностей энергетического баланса на поверхности показало, что подземные воды ниже критической глубины (приблизительно в 1 м для хорошо дренированной песчаной почвы и несколько метров для глинистой почвы) не могут быть обнаружены на изображениях теплового инфракрасного диапазона<sup>53</sup>. Предположительно необычно теплые подземные воды могут увеличить критическую глубину из-за влияния переноса тепла на поверхность, но необходимый анализ выходит за рамки данной статьи.

Возможный выход теплового факела из водоносного горизонта в зону выброса представляет дополнительную возможность обнаружения, но выбросы могут прервать эксплуатацию реактора и могут не стать заметными после прихода в тепловое равновесие с поверхностью<sup>54</sup>. Если только поток не будет в основном протекать по трещинам, то гидродинамический фронт факела после выключения реактора будет медленно перемещаться с региональной скоростью потока подземных вод. Подземные воды в известковом горизонте со средней пористостью ( $\phi = 0,14$ ), поддерживающем разнесение скважин на 500 м (например,  $l = 0,15$ ,  $K = 2 \cdot 10^{-5}$  м/с, смотрите таблицу 3 и используйте уравнение 2) текут со скоростью примерно 0,7 км/год. Тепловой фронт отстает от гидродинамического фронта, постепенно охлаждаясь при встрече с более холодной матрицей горизонта<sup>55</sup>.

В то время как такие выбросы могут не проявиться при наблюдениях сверху, сеть наземных датчиков может оказаться способной отличить работу реактора от естественных тепловых явлений. Например, температура родников и скважин для мониторинга в водоносном горизонте из карстового известняка может коррелироваться с такими факторами, как: температура воздуха и осадки с потоками подземных вод через верхний слой карста (геологический пласт, смотрите рисунок 4) в период дождей; температура воздуха и неглубокими потоками грунтовых вод в течение сухих периодов; и более глубоких источников подземных вод с почти постоянной температурой. Анализ распределения температуры подземных вод и уровней сетью наземных регистраторов может позволить обнаружить аномалии, не связанные с факторами окружающей среды, которые могут быть связаны с эксплуатацией реактора<sup>56</sup>.

Закачка на большие глубины практически полностью уничтожает тепловые сигнатуры факела. Из-за геотермального градиента температура подповерхностных слоев сравнивается с температурой закачиваемой жидкости (90 °С) на глубине примерно в 5 км под поверхность<sup>57</sup>. При уменьшении разности температуры между факелом и подповерхностным слоем влияние закачиваемой жидкости может стать практически не обнаружимым. Однако, бурильные операции будет трудно скрыть, а изолирование жидкостей на больших

глубинах может нарушить водный баланс водоносного горизонта, и потенциально повлиять на расположенных вниз по течению пользователей в регионах с недостатком воды.

### **Индукцированная сейсмичность**

Сейсмичность, индуцированная откачкой и закачкой воды, также может указывать на аномальную деятельность, но ее будет трудно отличить от фоновых событий. Индуцированную сейсмичность можно будет отличить от природной сейсмичности, коррелируя времена и местоположение сейсмических событий с деятельностью по закачке, либо с помощью полуколичественных методов отсчета, либо с помощью количественной статистической техники<sup>58</sup>. В то время как ощущаемые населением случаи индуцированной сейсмичности скорее связаны с закачкой больших объемов жидкости с большими потоками на протяжении длительных периодов, пары скважин со сбалансированной закачкой и откачкой в гораздо меньшей степени возмущают водоносный горизонт, и будут приводить к менее ощущаемым сейсмическим явлениям. Тем не менее, тепловые напряжения от закачки ассоциировались с индуцированной сейсмичностью в геотермальных полях. Вообще говоря, предотвращение значительных изменений в суммарном давлении в порах (например, уменьшение интенсивности закачки), отказ от областей с близким к критическому состоянию напряжений вдоль трещин или разломов, и от геологической среды, восприимчивой к хрупкому разлому, уменьшают потенциал индуцированной сейсмичности<sup>59</sup>.

### **Химические и радиологические сигнатуры**

Обнаружимые химические фронты могут развиваться после закачки химически измененных жидкостей и действия гидродинамических и тепловых фронтов. Однако, если только охлаждающая вода не была обработана (например, для замедления коррозии, из-за загрязнения теплообменника, и т.п.), или если радионуклиды не попали непреднамеренно в охлаждающую воду, то закачиваемые жидкости в целом остаются неизменными и их потенциал для образования подповерхностных химических или радиологических фронтов будет ограничен. Тем не менее, дегазация не конденсирующихся газов внутри завода может уменьшить концентрацию газа в водоносном горизонте<sup>60</sup>. Закачиваемая вода может также активировать химический фронт способом, похожим на методы восстановления, использующие закачиваемый пар для вымывания загрязнений из водоносного горизонта<sup>61</sup>. Осаждение растворенных минералов может привести к видимому окрашиванию вокруг зон слива. Например, гиперспектральные обзоры с самолетов позволили обнаружить минеральные геотермальные индикаторы, которые в совокупности с наземными измерениями температуры предоставили указания на скрытый геотермальный резервуар<sup>62</sup>.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Хотя подтвержденных сообщений о реакторах, охлаждаемых подземным источником, нет, это предварительное исследование выявило потенциальный пробел в каталоге систем аналитика нераспространения. Охлаждение небольшого реактора для производства плутония с помощью пары скважин представляется осуществимым в определенном диапазоне термогидравлических и гидрогеологических условий. Закачка нагретой охлаждающей воды в подповерхностные слои, возможно, в естественном подземном канале, может рассеивать тепловую энергию под поверхностью. В системе, закачивающей воду в водоносный горизонт при высокой температуре, одиночная откачивающая скважина может обеспечить достаточный поток охлаждающей воды для небольшого реактора.

Если такой реактор был бы построен, то аналитики нераспространения, не знакомые с охлаждением от подземного источника, были бы введены в заблуждение. Вместо клубов пара или потоков охлаждающей воды, кажущиеся безобидными водяные скважины могут охладить реактор на площадках без доступа к поверхностной воде. Тепловые аномалии, кажущиеся неуловимыми, могут значительно замедлить работу реактора. Сейсмические колебания, вызванные откачкой и закачкой жидкости, могут быть незамеченными или неинтересными. Эти, и другие сигнатуры, такие, как геоморфологические изменения и строительная деятельность, могут быть упущены или приписаны не к реактору, а к чему-нибудь другому.

Тем не менее, понимание охлаждения от подземного источника способствует обнаружению. Хотя водяные скважины кажутся обычными, площадки могут быть признаны приоритетными для дальнейшего внимательного изучения на основании сигналов о подходящей инфраструктуре и гидрологических условий, спо-

собствующих подземному потоку. Определенные выводы могут потребовать инспекции на месте, если тепловые сигнатуры окажутся неоднозначными. В конечном счете, осведомленность о технологических возможностях определяет уровень внимательности инспекций, необходимый для подтверждения отсутствия тайных ядерных реакторов и для сдерживания от таких попыток благодаря риску раннего обнаружения.

В то время как концепция реактора с охлаждения от подземного источника может оказаться всего лишь плодом соединения двух установившихся технологий, его реализация потребует усилий по исследованиям и разработкам, выходящих за рамки данного исследования. Принимая во внимание предупреждение адмирала Рикопера об обманчивой природе «бумажных реакторов»<sup>63</sup>, проблемы охлаждения подземным источником и природа его обнаружимых сигнатур могут быть полностью осознаны только после подробного анализа в реалистичном гидрогеологическом окружении.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы с благодарностью признают полезные замечания и предложения от (в алфавитном порядке) Алессандро Казассо, Виллема Янссенса, Альберто Писточчи, Филиппо Севини, Иоанниса Тричакиса, Харуко Уэйнрайта, и трех анонимных рецензентов. Любые мнения, результаты, и выводы или рекомендации, выраженные в этом материале, принадлежат авторам, и не обязательно отражают взгляды Объединенного исследовательского центра Европейской Комиссии.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Эта работа явилась результатом исследований, выполненным в рамках проектов «Информация из открытых источников по ядерной безопасности» (Open Source Information for Nuclear Security – OSINS) и «Инновационные концепции и методологии для ядерных гарантий» (Innovative Concepts and Methodologies for Nuclear Safeguards – INSAF), финансируемых по программе исследований и обучения «Евратом Горизонт 2020».

## ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. H. Zhang, "Uses of Commercial Satellite Imagery in FMCT Verification," *The Nonproliferation Review*, Summer 2000; Hui Zhang and Frank von Hippel, "Using Commercial Imaging Satellites to Detect the Operation of Plutonium Production Reactors and Gaseous-Diffusion Plants" *Science & Global Security* 8 (2000): 219-71.
2. "Cooling Power Plants," *World Nuclear Association*, September 2014, <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Cooling-Power-Plants/>; J. Macknick et al., "Operational Water Consumption and Withdrawal Factors for Electricity Generating Technologies: A Review of Existing Literature," *Environmental Research Letters* 7, 4 (2012); W. A. Jury, G. Sinai and L. H. Stolzy, "Future Sources of Cooling Water for Power Plants in Arid Regions," *Journal of the American Water Resources Association* 15 (1979): 1444-1458; L. Borghei and R. H. Khoshkho, "Computational Fluid Dynamics Simulation on a Thermal Power Plant with Air-Cooled Condenser," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 226, 7 (2012): 837-847.
3. O.A. Bukharin, "The Cold War Atomic Intelligence Game, 1945-70," *Studies in Intelligence* 48 (14 April 2007).
4. Zhang and von Hippel, "Using Commercial Imaging Satellites to Detect the Operation of Plutonium Production Reactors and Gaseous-Diffusion Plants." (ссылка 1)
5. Yongbyon, North Korea 39°47'45.20"N 125°45'19.63"E" (Google Earth Pro v. 7.1.2.2041, April 2, 2004), <http://www.google.com/earth/index.html>.
6. Yongbyon, North Korea 39°47'45.20"N 125°45'19.63"E" (Google Earth Pro v. 7.1.2.2041, December 2, 2013), <http://www.google.com/earth/index.html>.
7. National Aeronautics and Space Administration, "Power Plant Monitoring," *NASA Earth Observatory (NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS)*, April 28, 2001, <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=1379>
8. Eskom, "Matimba Power Station," 2015, [http://www.eskom.co.za/Whatweredoing/ElectricityGeneration/PowerStations/Pages/Matimba\\_Power\\_Station.aspx](http://www.eskom.co.za/Whatweredoing/ElectricityGeneration/PowerStations/Pages/Matimba_Power_Station.aspx); "Matimba Power Station, 23°40'8.78"S 27°36'41.61"E" (Google Earth Pro v. 7.1.2.2041, September 25, 2013), <http://www.google.com/earth/index.html>
9. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, *Water, A Shared Responsibility* (Paris and New York, 2006).

10. F. G. Driscoll *Groundwater and Wells* (St. Paul, MN, USA: Johnson Screens, 1986); U.S. Geological Survey, W. A. Duffield and J. H. Sass, "Geothermal Energy – Clean Power From the Earth's Heat," 2003, <http://pubs.usgs.gov/circ/2004/c1249/c1249.pdf>; W. J. Schaetzle et al., *Thermal Energy Storage in Aquifers: Design and Applications* (Pergamon Press, 1980); D. Banks, "Ground Source Cooling," in *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling* (Wiley-Blackwell, 2012), 133-49; K. Averytetal., "Freshwater Use by U.S. Power Plants Electricity's Thirst for a Precious Resource" (Union of Concerned Scientists, November 2011).
11. Banks, "Ground Source Cooling." (ссылка 10)
12. M. J. Lippmann and C. Fu Tsang, "Ground-Water Use for Cooling: Associated Aquifer Temperature Changes," *Ground Water* 18, 5 (October 1980).
13. Сетевые дополнения к данной статье.
14. Driscoll, *Groundwater and Wells* (ссылка 10); "Confined or Artesian Groundwater," *National Groundwater Association*, 18 October 2010, <http://www.ngwa.org/fundamentals/hydrology/pages/confined-or-artesian-groundwater.aspx>; J. R. Nimmo, R. W. Healy and D. A. Stonestrom, "Aquifer Recharge," in *Encyclopedia of Hydrological Sciences* (John Wiley & Sons, Ltd, 2006).
15. Driscoll, *Groundwater and Wells*. (ссылка 10)
16. G. S. Bodvarsson and V. Stefansson, "Reinjection into Geothermal Reservoirs," in *Geothermal Reservoir Engineering*, ed. Ender Okandan, 150, NATO ASI Series (Springer Netherlands, 1988).
17. Schaetzle et al., *Thermal Energy Storage in Aquifers: Design and Applications*; Ryan Doucette, "Thermal Patterns of Subsurface Flow Regimes in Mantled Karst Aquifer NW Arkansas" (Masters Thesis, Illinois State University, 2012); T. Waltham, F. G. Bell and M. G. Culshaw *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction* (Berlin Heidelberg: Springer, 2005).
18. M. Kasenow, *Applied Ground-Water Hydrology and Well Hydraulics* (Water Resources, 2000).
19. Lippmann and Tsang, "Ground-Water Use for Cooling: Associated Aquifer Temperature Changes" (ссылка 12); Gudmundur S. Bodvarsson and Valgardur Stefansson, "Some Theoretical and Field Aspects of Reinjection in Geothermal Reservoirs," *Water Resources Research* 25 (1989): 1235-1248.
20. Lippmann and Tsang, "Ground-Water Use for Cooling: Associated Aquifer Temperature Changes" (ссылка 12); D. Banks, "Thermogeological Assessment of Open-Loop Well-Doublet Schemes: A Review and Synthesis of Analytical Approaches," *Hydrogeology Journal* 17 (2009): 1149-1155; A. Casasso and R. Sethi, "Modelling Thermal Recycling Occurring in Groundwater Heat Pumps (GWHPs)," *Renewable Energy* 77 (2015): 86-93.
21. Banks, "Thermogeological Assessment of Open-Loop Well-Doublet Schemes: A Review and Synthesis of Analytical Approaches." (ссылка 20)
22. Kasenow, *Applied Ground-Water Hydrology and Well Hydraulics*. (ссылка 18)
23. National Research Council, *Contaminants in the Subsurface: Source Zone Assessment and Remediation* (Washington, DC: The National Academies Press, 2004).
24. U.S. Geological Survey et al., "On the Mechanism of the Large Hydraulic Gradient Under Yucca Mountain, Nevada," 9 March 1998.
25. Lippmann and Tsang, "Ground-Water Use for Cooling: Associated Aquifer Temperature Changes." (ссылка 12)
26. Jury, Sinai, and Stolzy, "Future Sources of Cooling Water for Power Plants in Arid Regions" (ссылка 2); Driscoll, *Groundwater and Wells* (ссылка 10).
27. "Plutonium Production," *Federation of American Scientists*, 20 June 2000, <http://www.fas.org/nuke/intro/nuke/plutonium.htm>; International Atomic Energy Agency, "IAEA Safeguards Glossary," International Nuclear Verification Series (Austria, 2002), <http://www-ns.iaea.org/standards/concepts-terms.asp>.
28. D. Benoit, S. Johnson and M. Kumataka, "Development of an Injection Augmentation Program at the Dixie Valley, Nevada Geothermal Field," in *World Geothermal Congress 2000* (Kyushu - Tohoku, Japan, 2000).
29. Banks, "Thermogeological Assessment of Open-Loop Well-Doublet Schemes: A Review and Synthesis of Analytical Approaches." (ссылка 20)
30. National Research Council, *Contaminants in the Subsurface: Source Zone Assessment and Remediation*. (ссылка 23)
31. Waltham, Bell, and Culshaw, *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. (ссылка 17)
32. Lippmann and Tsang, "Ground-Water Use for Cooling: Associated Aquifer Temperature Changes." (ссылка 12)

33. Banks, "Thermogeological Assessment of Open-Loop Well-Doublet Schemes: A Review and Synthesis of Analytical Approaches" (ссылка 20); Bodvarsson and Stefansson, "Some Theoretical and Field Aspects of Reinjection in Geothermal Reservoirs." (ссылка 19)
34. T. Harter, "Water Well Design and Construction," Farm Water Quality Planning Reference Sheet (Regents of the University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, 2003); Driscoll, *Groundwater and Wells*.
35. Driscoll, *Groundwater and Wells*. (ссылка 10)
36. Там же.
37. C. V. Theis, "The Source of Water Derived from Wells: Essential Factors Controlling the Response of an Aquifer to Development," *Civil Engineering Magazine*, May 1940; Nimmo, Healy, and Stonestrom, "Aquifer Recharge." (ссылка 14)
38. U.S. Geological Survey et al., "Estimating Areas Contributing Recharge to Wells: Lessons from Previous Studies" (Denver, CO, 1998); U.S. Geological Survey, T. E. Reilly and D. W. Pollock, "Factors Affecting Areas Contributing Recharge to Wells in Shallow Aquifers" (Denver, CO, 1993); S. Grubb, "Analytical Model for Estimation of Steady-State Capture Zones of Pumping Wells in Confined and Unconfined Aquifers," *Ground Water*, February 1993; H. Haitjema, "The Role of Hand Calculations in Ground Water Flow Modeling," *Ground Water*, December 2006; U.S. Environmental Protection Agency, "A Systematic Approach for Evaluation of Capture Zones at Pump and Treat Systems," January 2008.
39. Nimmo, Healy, and Stonestrom, "Aquifer Recharge" (ссылка 14); U.S. Department of Agriculture, "Groundwater Recharge," June 1967.
40. U.S. Environmental Protection Agency et al., "Injection Well Construction Practices and Technology," October 1982; P. S. Sarathi and D. K. Olsen *Practical Aspects of Steam Injection Processes a Handbook for Independent Operators* (Bartlesville, OK, USA: National Institute for Petroleum and Energy Research, October 1992).
41. R. Corsi, "Engineering Aspects of CaCO<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> Scaling," in *Geothermal Reservoir Engineering*, ed. E. Okandan 150, NATO ASI Series (Netherlands: Springer, 1988); Bodvarsson and Stefansson, "Reinjection into Geothermal Reservoirs" (ссылка 19); Driscoll, *Groundwater and Wells*. (ссылка 10)
42. Schaetzle et al., *Thermal Energy Storage in Aquifers: Design and Applications*; Bodvarsson and Stefansson, "Some Theoretical and Field Aspects of Reinjection in Geothermal Reservoirs" (ссылка 19); U.S. Environmental Protection Agency et al., "Injection Well Construction Practices and Technology" (ссылка 40); Sarathi and Olsen, *Practical Aspects of Steam Injection Processes a Handbook for Independent Operators* (ссылка 40); G. Bodvarsson, "Thermal Problems in the Siting of Reinjection Wells," *Geothermics* 1 (1972): 63-66; U.S. Environmental Protection Agency and E. L. Davis, "Steam Injection for Soil and Aquifer Remediation," *Ground Water Issue*, January 1998; E. Kaya S. J. Zarrouk and M.J. O'Sullivan, "Reinjection in Geothermal Fields: A Review of Worldwide Experience," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011): 47-68.
43. E.M. Smith, "Ground-Water Use for Nuclear Power Plants," *Ground Water* 16 (1978):352- 353; A. Arad and A. Olshina, "Brackish Groundwater as an Alternative Source of Cooling Water for Nuclear Power Plants in Israel," *Environmental Geology and Water Sciences* 6 (1984): 157-60.
44. Benoit, Johnson, and Kumataka, "Development of an Injection Augmentation Program at the Dixie Valley, Nevada Geothermal Field;" "Dixie Valley Power Plant 39°57' 58.43"N 117°51' 21.16' W" (Google Earth Pro v. 7.1.2.2041, March 23, 2014), <http://www.google.com/earth/index.html>.
45. Driscoll, *Groundwater and Wells*. (ссылка 10)
46. Bodvarsson, "Thermal Problems in the Siting of Reinjection Wells." (ссылка 19)
47. Waltham, Bell, and Culshaw, *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction* (ссылка 17); M.W. Becker, "Potential for Satellite Remote Sensing of Ground Water," *Ground Water* 44 (2006): 306-318; C. Heimlich et al., "Uplift Around the Geothermal Power Plant of Landau (Germany) as Observed by InSAR Monitoring," *Geothermal Energy* 3 (2015):2; F. van der Meer et al., "Geologic Remote Sensing for Geothermal Exploration: A Review," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 33(2014):255-269.
48. Zhang, "Uses of Commercial Satellite Imagery in FMCT Verification" (ссылка 1); Zhang and von Hippel, "Using Commercial Imaging Satellites to Detect the Operation of Plutonium Production Reactors and Gaseous-Diffusion Plants" (ссылка 1); R. Greg Vaughan et al., "Exploring the Limits of Identifying Sub-Pixel Thermal Features Using ASTER TIR Data," *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 189 (2010):225-37.
49. Becker, "Potential for Satellite Remote Sensing of Ground Water" (ссылка 47); Meer et al., "Geologic Remote Sensing for Geothermal Exploration: A Review" (ссылка 47); Vaughan et al., "Exploring the Limits of Identifying Sub-Pixel Thermal Features Using ASTER TIR Data" (ссылка 48); F. Alkhaier, Z. Su and G. N. Flerchinger,

- “Reconnoitering the Effect of Shallow Groundwater on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance Using MODIS and SEBS,” *Hydrology and Earth System Sciences* 16 (2012): 1833-1844; F. Alkhaier and Z. Su, “The Effect of Shallow Groundwater on Soil Temperature and Soil Heat Flux Near Land Surface,” in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, ed. D.N. Arabelos and C.C. Tscherning 11, EGU General Assembly Conference Abstracts, 2009, 1008; F. Alkhaier R. J. Schotting and Z. Su, “A Qualitative Description of Shallow Groundwater Effect on Surface Temperature of Bare Soil,” *Hydrology and Earth System Sciences* 1 3 (September 2009): 1 749-56; F. Alkhaier, “Shallow Groundwater Effect on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance: Description, Modeling and Remote Sensing Application” (Doctoral Dissertation, University of Twente, 2011); F. Alkhaier G. N. Flerchinger and Z. Su, “The Thermodynamic Effect of Shallow Groundwater on Temperature and Energy Balance at Bare Land Surface, Heat Analysis and Thermodynamic Effects,” in *Heat Analysis and Thermodynamic Effects*, ed. Amimul Ahsan (Intech, 2011), <http://www.intechopen.com/books/heat-analysis-and-thermodynamic-effects>; F. Alkhaier G. N. Flerchinger and Z. Su, “Shallow Groundwater Effect on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance Under Bare Soil Conditions: Modeling and Description,” *Hydrology and Earth System Sciences* 16 (2012):1817- 1831; Christian Haselwimmer and Anupma Prakash, “Thermal Infrared Remote Sensing of Geothermal Systems,” in *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*, ed. Claudia Kuenzer and Stefan Dech, *Remote Sensing and Digital Image Processing* (Springer Netherlands, 2013).
50. Becker, “Potential for Satellite Remote Sensing of Ground Water” (ссылка 47); O. Friman et al., “Methods for Large-Scale Monitoring of District Heating Systems Using Airborne Thermography,” *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 52, 8 (August 2014):5175-5182; S.R.J. Axelsson, “Thermal Modeling for the Estimation of Energy Losses from Municipal Heating Networks Using Infrared Thermography,” *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 26 (September 1988): 686-692; H. Zinko et al., “Quantitative Heat Loss Determination by Means of Infrared Thermography - The TX Model,” IEA District Heating, Annex 4, Network Supervision (International Energy Agency, June 1996).
  51. Bodvarsson and Stefansson, “Some Theoretical and Field Aspects of Reinjection in Geothermal Reservoirs.” (ссылка 19)
  52. Haselwimmer and Prakash, “Thermal Infrared Remote Sensing of Geothermal Systems” (ссылка 49); Mark F. Coolbaugh and Lisa A. Shevenell, “A Method for Estimating Undiscovered Geothermal Resources in Nevada and the Great Basin,” *Geothermal Resources Council Transactions* 28 (September 29, 2004).
  53. Alkhaier, Flerchinger, and Su, “Shallow Groundwater Effect on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance Under Bare Soil Conditions: Modeling and Description” (ссылка 49); Alkhaier, Su, and Flerchinger, “Reconnoitering the Effect of Shallow Groundwater on Land Surface Temperature and Surface Energy Balance Using MODIS and SEBS.” (ссылка 49)
  54. Becker, “Potential for Satellite Remote Sensing of Ground Water.” (ссылка 47)
  55. Lippmann and Tsang, “Ground-Water Use for Cooling: Associated Aquifer Temperature Changes” (ссылка 12); Bodvarsson and Stefansson, “Some Theoretical and Field Aspects of Reinjection in Geothermal Reservoirs.” (ссылка 19)
  56. R. Doucette and E. W. Peterson, “Identifying Water Sources in a Karst Aquifer Using Thermal Signatures,” *Environmental Earth Sciences* 72 (2014): 5171-82; Doucette, “Thermal Patterns of Subsurface Flow Regimes in Mantled Karst Aquifer NW Arkansas” (ссылка 17); A. J. Luhmann et al., “Classification of Thermal Patterns at Karst Springs and Cave Streams,” *Ground Water* 49 (2011): 324-35; M. P. Anderson, “Heat as a Ground Water Tracer,” *Ground Water* 43 (2005): 951-968.
  57. Kasenow, *Applied Ground-Water Hydrology and Well Hydraulics*. (ссылка 18)
  58. S. D. Davis P. A. Nyffenegger and C. Frohlich, “The 9 April 1993 Earthquake in SouthCentral Texas: Was It Induced by Fluid Withdrawal?” *Bulletin of the Seismological Society of America* 85 (1995): 1888-1895; I. Oprsal and L. Eisner, “Cross-Correlation—An Objective Tool to Indicate Induced Seismicity,” *Geophysical Journal International* 196 (2014): 15361543.
  59. National Research Council, *Induced Seismicity Potential in Energy Technologies* (Washington, DC: The National Academies Press, 2013); K. F. Evans et al., “A Survey of the Induced Seismic Responses to Fluid Injection in Geothermal and CO<sub>2</sub> Reservoirs in Europe,” *Geothermics* 41 (2012): 30-54; M. Weingarten et al., “High-Rate Injection Is Associated with the Increase in U.S. Mid-Continent Seismicity,” *Science* 348 (18 June 2015): 1336-1340.
  60. Bodvarsson and Stefansson, “Some Theoretical and Field Aspects of Reinjection in Geothermal Reservoirs.” (ссылка 19)
  61. U.S. Environmental Protection Agency and Davis, “Steam Injection for Soil and Aquifer Remediation.” (ссылка

42)

62. Becker, "Potential for Satellite Remote Sensing of Ground Water" (ссылка 47); Haselwimmer and Prakash, "Thermal Infrared Remote Sensing of Geothermal Systems" (ссылка 49); Christopher Kratt et al., "Identification of a New Blind Geothermal System with Hyperspectral Remote Sensing and Shallow Temperature Measurements at Columbus Salt Marsh, Esmeralda County, Nevada," *GRC Transactions* 33 (2009).
63. H.G. Rickover, "Paper Reactors, Real Reactors," 5 June 1953, [http://ecolo.org/documents/documents\\_in\\_english/Rickover.pdf](http://ecolo.org/documents/documents_in_english/Rickover.pdf).