

## ПОДЗЕМНОЕ ТЕПЛО ПОДЛЯССКО-БРЕСТСКОЙ ВПАДИНЫ

В.И.Зуй

Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси

ул. Купревича, 7, 220141, Минск, Беларусь

E-mail: [zui@igig.org.by](mailto:zui@igig.org.by)

### Резюме

*В статье приведены сведения о геотермических условиях восточной части Подляско-Брестской впадины (ПБВ) в пределах Беларуси. Рассмотрена структура геотемпературного поля и распределение температуры на глубине 300 м, выполнена оценка плотности ресурсов геотермальной энергии. Представлены результаты расчета геотермального потенциала для кембрийского геотермального комплекса. В целом, вся территория белорусской части ПБВ представляет интерес для практического использования тепла недр. Наибольшие ресурсы подземного тепла сосредоточены в западной части региона на территории Брестского, Каменецкого и Жабинковского районов. В приграничных районах с Польшей по мере увеличения мощности платформенного чехла возрастает температура в погруженных водоносных горизонтах. Это отражается на увеличении плотности ресурсов геотермальной энергии до 300–350 кг.у.т./м<sup>2</sup>. Первоочередными районами для практического освоения подземного тепла являются Брестский, Каменецкий и Жабинковский для отопления с помощью теплонасосных установок жилых и производственных зданий, объектов агропромышленного комплекса, в том числе агрогородков.*

### Введение

Проблема использования возобновляемых ресурсов подземного тепла не нова, однако до последнего времени ее ресурсы в пределах платформенного чехла Подляско-Брестской впадины не оценивались. Устойчивый рост цен на импортируемый страной природный газ и нефтепродукты, наблюдаемый в последние годы, делает актуальной проблему освоения альтернативных источников энергии.

Настоящая работа ориентирована не столько на детальную оценку ресурсов геотермальной энергии в пределах региона, и тем более - для каждого потребителя тепла, расположенного в восточной части Подляско-Брестской впадины, сколько на ее предварительную оценку с выделением геотермальных горизонтов, представляющих практический интерес для ее извлечения. Более детальная проработка должна рассматриваться при проектировании конкретных объектов, использующих геотермальную энергию.

## Особенности геологического строения региона

Тепловой режим платформенного чехла в значительной степени определяются геологическим строением региона. Рассматриваемая территория является фрагментом более крупной структуры, которую разные авторы именовали как Польско-Литовская, Польско-Германская, Львовско-Брестская, Днестро-Бугская впадины, Белорусско-Польская мульда (Жирмунский, 1919; Жирмунский, 1927; Шатский, 1937; Горелик, 1947; Архангельский, 1947; Махнач, 1958). Наиболее устоявшимся названием в настоящее время является Подляско-Брестская впадина. Ряд исследователей использовал для белорусской части Подляско-Брестской впадины также термин «Брестская впадина» (Бондаренко, Хотько, 1961; Международная..., 1964; Геология, 1971). Название единой структуры - Подляско-Брестской впадины (Геология, 2001), расположенной на территории Беларуси, используется в настоящей работе. Под сокращением ПБВ в тексте будем понимать ту часть впадины, которая находится в пределах Беларуси.

Восточная часть ПБВ представляет собой один из осадочных бассейнов Беларуси. На севере его ограничивает Белорусская антеклиза, на востоке - Полесская седловина, на юге впадина ограничена Лукувско-Ратновским выступом фундамента, лишь небольшая часть которого находится в пределах Беларуси (рис. 1). Платформенный чехол ПБВ представлен осадочными породами с маломощными толщами девонских вулканогенных отложений. Краткое геологическое описание региона приведено ниже по данным (Геология, 2001; Богомоллов и др., 1971; Зиновенко, 1986; Основы..., 2004), а краткая гидрогеологическая характеристика – в основном по работе (Станкевич, 2004).

Поверхность фундамента плавно погружается с востока на запад, соответственно увеличивается мощность платформенного чехла от 0,5 км до 1,5 – 1,8 км вблизи Белорусско-Польской границы. Впадина, выполненная разновозрастными осадочными породами, по кровле кристаллического фундамента, имеет вид структурного залива, который замыкается на востоке. Максимальная мощность отложений более 1,5 км наблюдается в полосе между г. Брестом и Высоковским глубинным разломом, снижаясь в направлении Дивинского и Северо-Ратновского разломов.

Основной объем глубокого бурения по изучению геологического строения впадины был выполнен в период 1950 – 1970 гг., на Кустинской, Высоковской и Прибугской структурах и за их пределами было пробурено несколько десятков глубоких скважин. Прибугская структура была детально изучена после бурения более чем 100 скважин на небольшой площади (около 9 x 4 км) в ходе создания подземного газового хранилища. Во многих из этих скважин были выполнены геотермические исследования.

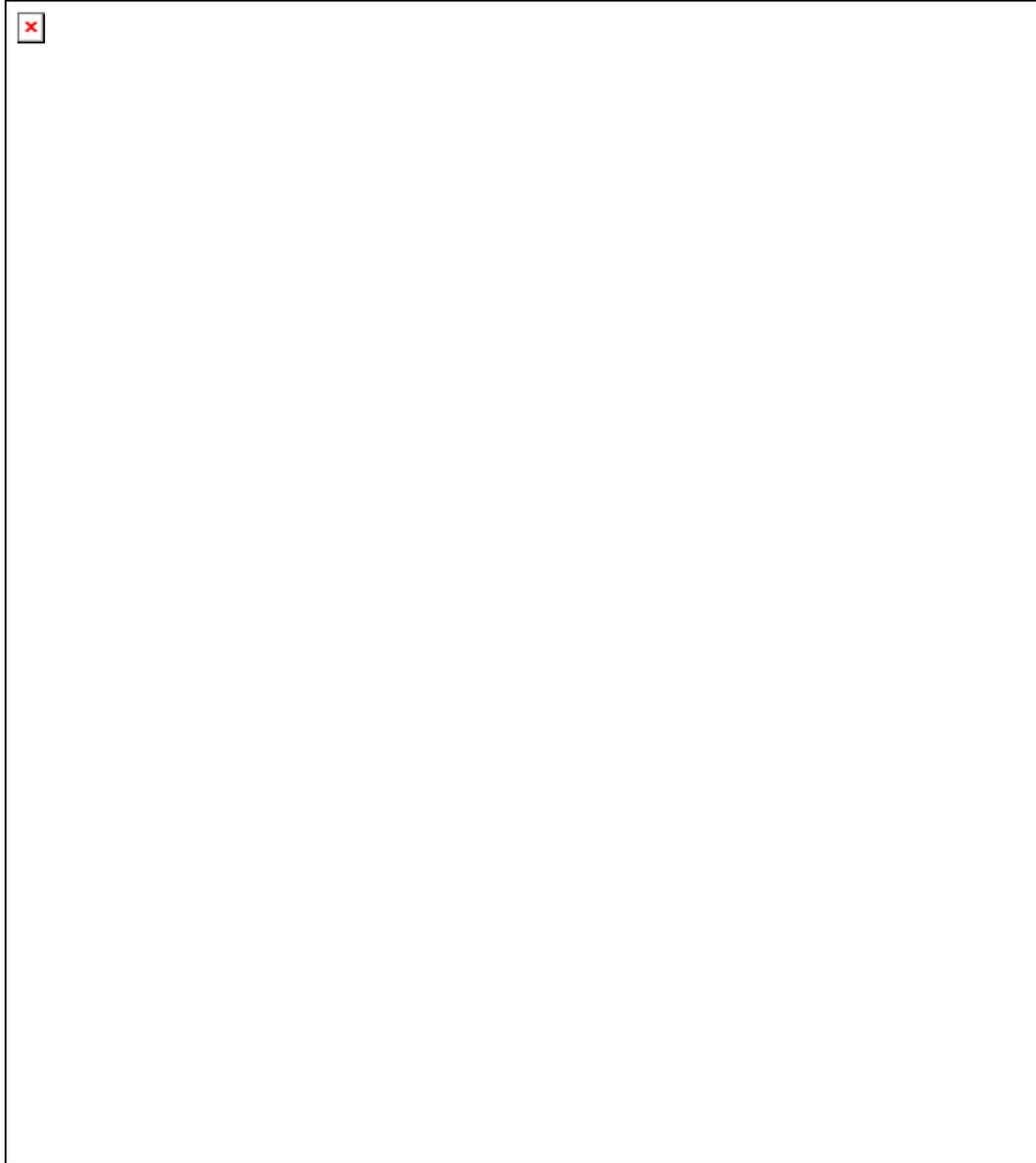


Рисунок 1 – Тектоническая схема строения белорусской части Подляско-Брестской впадины (Станкевич, 2004 с изменениями).

Обозначения: 1 – изогипсы по поверхности кристаллического фундамента, км; 2 – разломы, проникающие в осадочный чехол; 3 – государственные границы. Стрелками обозначено направление стока подземных вод с положительных структур во впадину. Жирной изогипсой –0,5 км обозначена восточная и северная границы ПБВ в пределах Беларуси.

Краткие сведения о геолого-тектоническом строении региона исследований приведены нами на основе (Геология, 2001; Зиновенко, 1986; Основы..., 2004; Станкевич, 2004).

В геологическом разрезе впадины выделяются два этажа. К нижнему относят отложения рифейского и вендского времени, верхнего протерозоя, кембрия, ордовика, силура, девона, карбона, перми, триаса (Станкевич, 2004). С проницаемыми горными породами платформенного чехла связаны подземные воды. Водонапорная система

впадины получила название Брестского артезианского бассейна (Станкевич, 2004). Верхний этаж разреза включает осадочные образования верхней юры, мела, палеогена, неогена, антропогена, которые перекрывают отложения нижнего этажа.

Образование Подляско-Брестской впадины связано с байкальскими тектоническими движениями. Излияние магм по ослабленным зонам здесь привело к накоплению изверженных вулканических пород, особенно на востоке впадины между Высоковским и Дивинским разломами (Зиновенко, 1986). Максимальное погружение впадины имело место в каледонский этап, когда произошло накопление мощной толщи осадочных пород и формирование локальных геологических структур в осадочном чехле. В нижней части разреза, представляющей наибольший интерес с точки зрения ресурсов геотермальной энергии, преобладают терригенные породы, в верхней части разреза – карбонатные отложения. К региональным водоупорам относят горизонт «синих глин» и волынские вулканогенные образования (Станкевич, 2004). Складчатым основанием впадины служат образования нижнего и среднего протерозоя (Зиновенко, 1986).

Резюмируя, отметим, что платформенный чехол впадины представлен терригенными породами верхнего рифея, мощностью до 250 м, терригенными и эффузивными отложениями венда, мощностью от 200 до 400 м, а также терригенно-глауконитовыми породами кембрия, карбонатами ордовика и силура. Кустинской опорной скважиной вскрыты мезозойские отложения, представленные песчаниками и известняками юры мощностью 80.5 м и нижнего оксфорда - 290 – 370.5 м, терригенно-карбонатными и меловыми толщами верхнего мела (сеноман в интервале 254 – 290 м, турон, коньяк, сантон и кампан на глубине 94 – 254 м) (Синичка и др., 1970; Кудельский и др., 1998). Менее мощными являются песчано-глинистые образования палеогеновой, неогеновой и антропогеновой систем кайнозоя мощностью 16, 28 и 50 м соответственно.

### **Гидрогеотермальные комплексы**

В гидрогеологическом разрезе впадины выделяют две гидродинамические системы - верхнюю и нижнюю. Первая из них охватывает водоносные горизонты антропогеновых, палеоген-неогеновых, верхнемеловых, альбских и верхнеюрских толщ. Их водное питание обеспечивается инфильтрацией метеорных вод и вод поверхностных водотоков. Глубже верхняя гидродинамическая система подстилается глинисто-мергелистыми отложениями ордовика и силура и глинисто-карбонатными толщами верхней перми и триаса, разделяющими верхнюю и нижнюю гидродинамические системы. Верхняя

гидродинамическая система характеризуется интенсивным водообменом (Кудельский и др., 1998).

Водоносные горизонты и комплексы верхнего протерозоя и кембрия составляют нижнюю гидродинамическую систему, связанную с зоной замедленного водообмена и содержащую минеральные воды (Кудельский и др., 1998).

Особенностью Брестского артезианского бассейна является мощная зона пресных вод (Кудельский и др., 2000; Кудельский, 2005). Она достигает 400 м и увеличивается в направлении границы с Польшей до 1200 и более метров (Кудельский, 2005). В окрестностях Бреста зона пресных вод распространена от антропогенных до кембрийских отложений включительно (Станкевич, 2004). Глубокое залегание подошвы пресных вод (с минерализацией до 1 г/л) является благоприятным фактором для использования геотермальной энергии в этом районе. Как теплые, так и горячие воды, либо рассолы могут быть подняты на земную поверхность через буровые скважины. Далее, посредством теплонасосных установок, их тепло может быть использовано для отопления зданий, обогрева теплиц и т.п.

Направление движения подземных вод от областей питания (Белорусская антеклиза, Полесская седловина, Лукувско-Ратновский выступ), к областям разгрузки в виде глубинного стока к центру впадины показано стрелками на рисунке 1. В гидродинамическом отношении изучаемая структура раскрыта в западном направлении.

Гидрогеологические горизонты и комплексы, содержащие подземные воды, рассматриваются нами в качестве основных гидрогеотермальных горизонтов Подляско-Брестской впадины. Их температура зависит от глубины погружения этих горизонтов, увеличивающейся в направлении Белорусско-Польской границы.



Рисунок 2 - Характерные термограммы мелких скважин белорусской части Подляско-Брестской впадины.

Обозначения термограмм: Брест 753 - линия с точками; Чернавчицы 750 - сплошная линия; Клейники 16 - линия с треугольниками; Мухавец 19 - штриховая линия.

Здесь в верхней наиболее обводненной части геологического разреза, температура по отдельным скважинам, например Клейники 16, Мухавец 19, пробуренным в окрестностях г. Бреста на глубине 250 м достигают только 14 °С (рис. 2). С практической точки зрения использование ресурсов геотермальной энергии здесь возможно, однако наибольший интерес представляют глубокие геотермальные горизонты, где температура значительно выше.

### **Геотермическое поле региона**

Подавляющее большинство из них сосредоточено в пределах Прибугской структуры. Геотермические исследования за ее пределами выполнены в немногих глубоких скважинах, расположенных неравномерно по площади ПБВ, главным образом, в полосе вдоль Белорусско-Польской границы. Южнее Бреста только одна глубокая скважина Скверики 1 охарактеризована термограммой до глубины 1000 метров.

Более половины использованных в работе термограмм относятся к Прибугской структуре, где расположено Прибугское подземное хранилище газа. Ее площадь занимает не более 1% от всей территории восточной части Подляско-Брестской впадины, а все изученные скважины (рисунок 3) расположены на небольшой, приграничной с Польшей, территории. Подавляющее большинство измерений распределения температуры по остальным мелким скважинам выполнено до глубины менее 500 м.

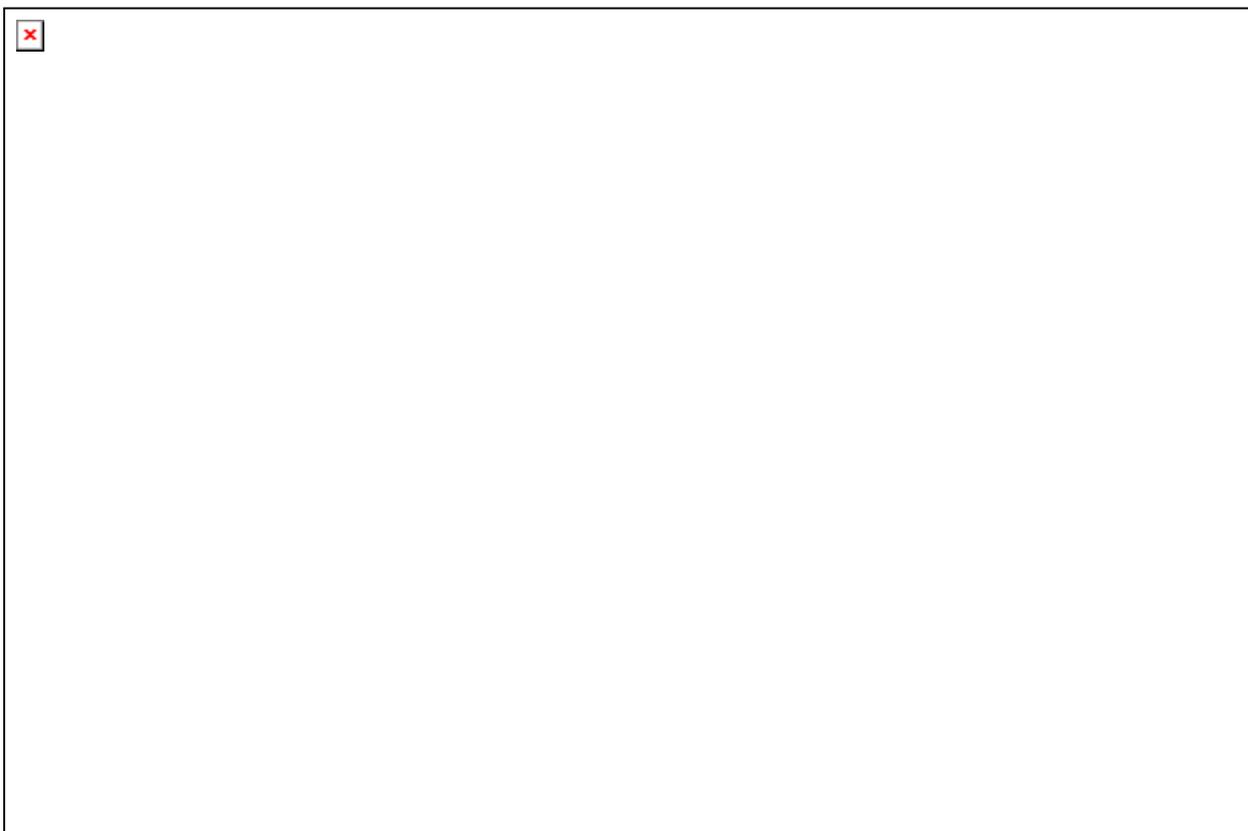


Рисунок 3 - Глубины и местоположение изученных скважин в регионе, по которым имеются термограммы.

Сокращения: ПБВ – Подляско-Брестская впадина; ПС – Прибугская структура. Красной линией обозначена восточная и северная граница ПБВ в пределах Беларуси, синими линиями – скважины, измеренных в 2006 г.

Длины вертикальных полосок в местах расположения изученных скважин изображают их глубину.

В регионе имеется около 90 термограмм, из них более половины относятся к Прибугской структуре. Вообще отсутствовали термограммы по прилегающим к границам Беларуси территориям Польши и Украины. Из рисунка 3 видно, что восточная, и особенно северная части Подляско-Брестской впадины в геотермическом плане изучены слабо. Оценка ресурсов геотермальной энергии здесь может быть лишь путем интерполяции.

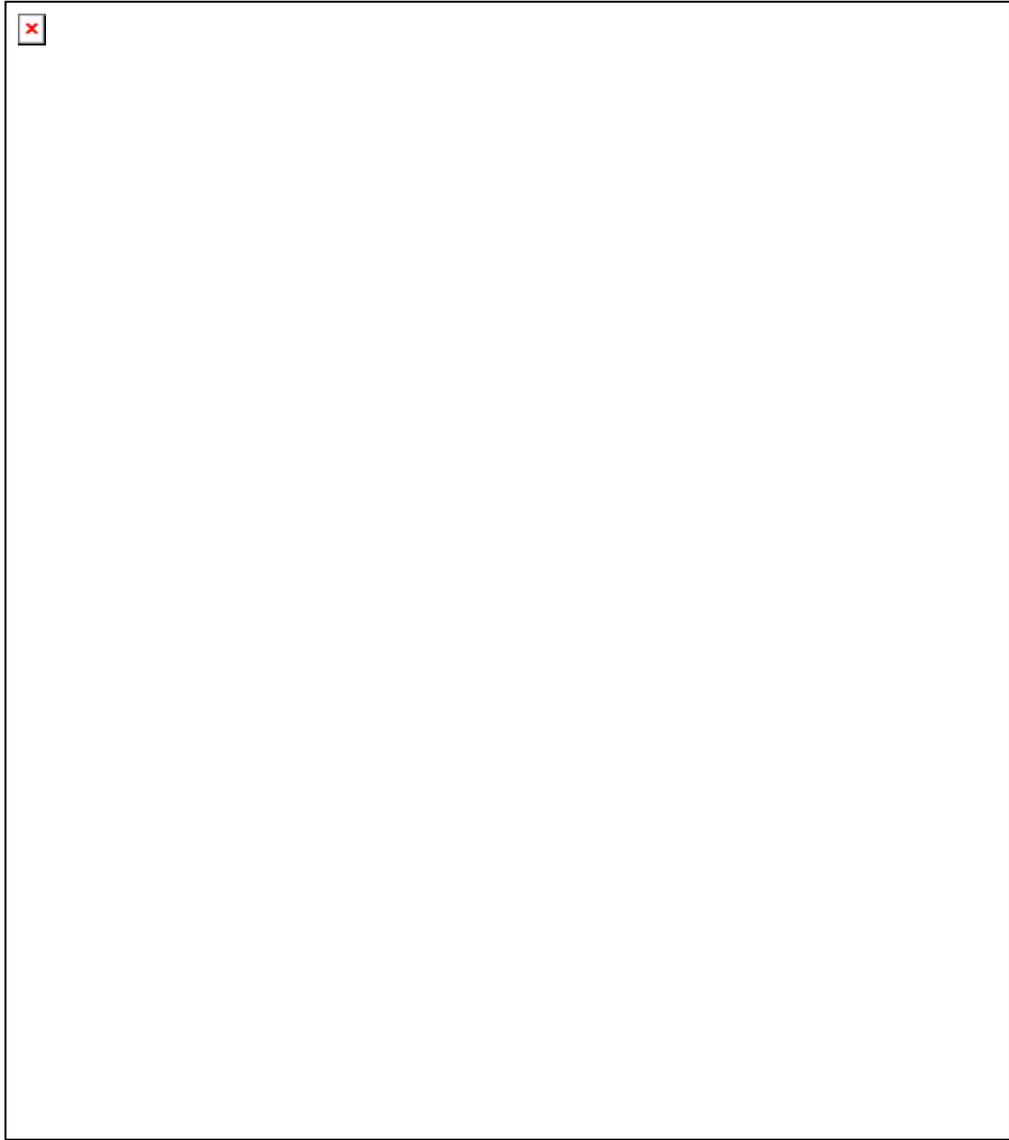


Рисунок 4 - Термограммы глубоких скважин Прибугская 12, Прибугская 50 и Мельник-IG1 (Дядькин и др., 1991), расположенных вблизи границы на польской стороне. Обозначения термограмм: Прибугская 12 – линия с точками; Прибугская 50 – сплошная линия; Мельник IG-1 – линия с треугольниками.

Температура горных пород и подземных вод повсеместно увеличивается с глубиной и на поверхности кристаллического фундамента (1300 – 1500 м) она может достигать 35-40 °С. Примером могут служить 3 производственные термограммы скважин № 12 и 50 Прибугской структуры, где на глубине более 1250 м зарегистрирована температура 34.3 и 37.1 °С, соответственно, а также - Мельник-IG1, расположенной на польской стороне (рис. 4). В наиболее погруженной части впадины геотермические исследования не выполнялись, ожидаемая температура могут превысить 40 °С.

В скважине Мельник-IG1 на момент измерений отсутствовало тепловое равновесие между стволом скважины и массивом горных пород. В результате верхняя часть

термограммы «перегрета», а нижняя «переохлаждена» и значение температуры 37,2 °С на глубине 1700 метров занижено, как минимум, на 5 °С.

### **Распределение температуры на глубине 300 метров**

Для построения карты распределения температуры на глубине 300 м (рисунок 5) были использованы собственные результаты регистрации термограмм в скважинах, достигших теплового равновесия. Температура на глубине 300 м в пределах карты изменяется от 10 до 16.5 °С (разница между крайними значениями – 6.5 °С).

Изотерма 12.5 °С, окаймляющая основную часть Подляско-Брестской впадины, имеет продолжение в пределы Польши на северо-западе и Украины – на юге. В центре положительной аномалии температура превышает 15 °С. Она прослеживается в Польшу, однако отсутствие здесь надежных геотермических наблюдений не позволяет изобразить ее более детально. В пределах впадины выделяется небольшая Кобрин-Пружанская аномалия повышенных значений температуры. Локальная аномалия пониженной температуры (менее 10,5 °С) выделяется узкой полосой в северной части карты возле населенного пункта Свислочь.

На прилегающих к границам Беларуси территориям Польши и Украины изотермы проведены путем экстраполяции и требуют уточнения. В целом, белорусская часть Подляско-Брестской впадины характеризуется повышенными температурами, они увеличиваются от восточной и северной окраин впадины к ее западной части.

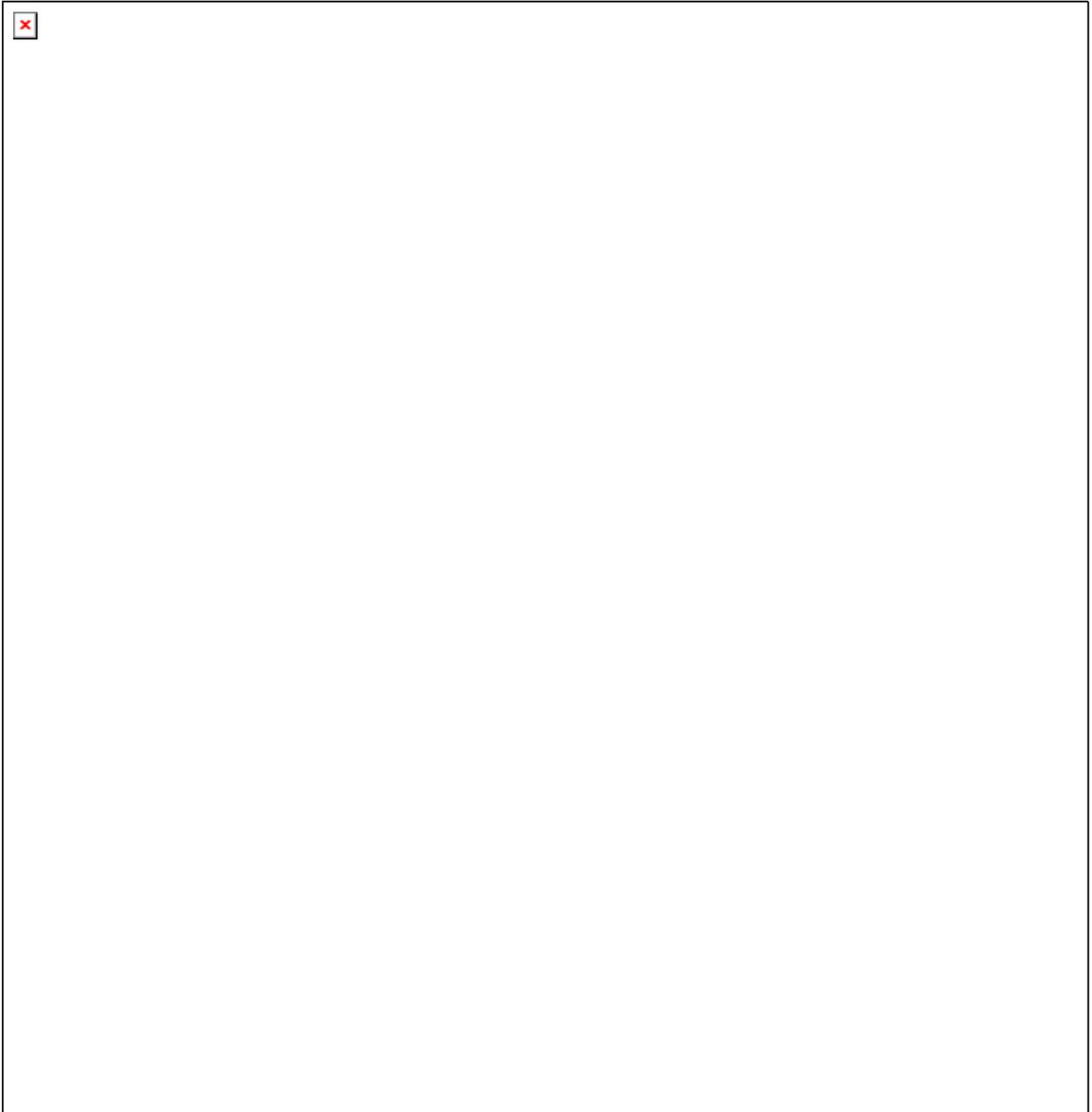


Рисунок 5 - Карта распределения температуры в белорусской части Подляско-Брестской впадины на глубине 300 м.

### **Методика определения плотности геотермальных ресурсов**

Геотермальные ресурсы – это та часть геотермальной энергии, которая может быть экономически рентабельно извлечена в настоящее время или в ближайшем будущем. Геотермальные резервы – это часть ресурсов, которая может эксплуатироваться в настоящее время и подтверждается данными бурения, геологическими, геофизическими и геохимическими исследованиями. Существует ряд методик определения плотности распределения геотермальных ресурсов (Дядькин и др., 1991; Franko, Kral, 1994; Hurter, Haenel, 2002; Sliapura et al, 2000; Вайнблат, Шувалов, 1982; Богуславский, 1984; Дядькин, 1985). Целью настоящей работы является предварительная количественная оценка

плотности геотермальных ресурсов в белорусской части Подляско-Брестской впадины и выделение районов, наиболее перспективных для проведения детальных исследований по практическому извлечению подземного тепла.

**Методика Санкт-Петербургского Горного института** позволяет выделять следующие категории ресурсов геотермальной энергии (Дядькин и др., 1991) - перспективные ( $C_3$ ) и прогнозные - ( $P_1$  и  $P_2$ ). Ресурсы категории  $P_1$  применяют при доказанной возможности освоения подземного тепла, тогда как ресурсы категории  $P_2$  учитывают лишь потенциальную возможность формирования и промышленной локализации месторождений геотермальной энергии для конкретной территории, либо геологической структуры без учета реальной возможности извлечения тепла. Оценка по категории  $P_2$  выполняется для больших регионов и базируется на анализе геотермических материалов для интервала разреза от глубины залегания так называемого нейтрального слоя до достижимой современными способами бурения глубины, обычно принимают - 10 км.

Ресурсы категории  $P_1$  рассчитывают с учетом директивных требований теплопотребителя по температуре поступающего и сбрасываемого теплоносителя с учетом коэффициента температурного извлечения (и возможного догрева теплоносителя) до глубин промышленно и массово освоенных бурением - 6 км.

Наконец, категория  $C_3$  учитывает экономическую целесообразность освоения геотермальной энергии с учетом как параметров конкретного теплопотребителя, так и конкретного геотермального месторождения. Другими словами, описанная методика, по сути, плохо применима для оценки плотности ресурсов извлекаемого геотермального тепла из платформенного чехла и кристаллического фундамента в Подляско-Брестской впадине из-за особенностей его геологического строения.

**Методика, принятая в странах западной Европы**, использует модель объемного содержания тепла в пористых коллекторах и предполагает извлечение геотермальной энергии системой дублетов скважин (эксплуатационная и нагнетательная) из платформенного чехла. Ресурс  $H_1$  (в Джоулях) оценивается по формуле (Hurter, Haenel, 2002):

$$H_1 = H_0 \cdot R_0, \quad (1)$$

где:  $H_0$  представляет собой тепло, содержащееся в породах на месте их залегания и подразумевает объемную модель его извлечения. Сюда включается тепло, запасенное в матрице горной породы ( $m$ ) и в воде (флюиде), заполняющей поровое пространство ( $w$ ):

$$H_0 = [(1-P) \cdot \rho_m \cdot c_m + P \cdot \rho_w \cdot c_w] \cdot [T_t - T_0] \cdot A \cdot \Delta z, \quad (2)$$

Где (Hurter, Haenel, 2002):

$\rho_m, \rho_w$  - плотность матрицы горной породы и воды, соответственно, кг/м<sup>3</sup>,

$c_m, c_w$  - удельная теплоемкость матрицы горной породы и воды, соответственно, Дж/(кг К),

$P$  - эффективная пористость, безразмерная величина,

$T_t$  - температура на кровле водоносного горизонта, °С,

$T_0$  - температура на земной поверхности, °С,

$A$  - рассматриваемая площадь земной поверхности, м<sup>2</sup>,

$\Delta z$  - эффективная мощность водоносного горизонта, м.

$R_0$  – коэффициент извлечения, представляющий собой часть тепла, которое подлежит добыче, и зависящий от используемой технологии. Если добыча производится с использованием дублета скважин, тогда:

$$R_0 = 0.33 (T_t - T_r) / (T_t - T_0), \quad (3)$$

где  $T_r$  - температура закачки (реинжекции), °С.

Описанная методика целесообразна для глубоких горизонтов Подляско-Брестской впадины, при которой через эксплуатационную скважину происходит подъем минеральной воды либо геотермального рассола, а через нагнетательную – захоронение отработанного флюида в водоносный горизонт. Возврат использованных термальных вод в геотермальный горизонт предотвращает как падение давления в нем во время эксплуатации, как и загрязнение поверхностных водотоков отработанными солеными водами. Группа экспертов Европейского Союза рекомендует принимать значение  $T_r = 25$  °С, хотя на практике используют и меньшую величину, например на Клайпедской геотермальной станции закачка отработанного рассола производится при температуре всего 11°С. Если используется только одна эксплуатационная скважина, например когда теплые воды пресные, то рекомендуется значение коэффициента извлечения (Hurter, Haenel, 2002):

$$R_0 \approx 0.1. \quad (4)$$

В расчет входят данные по объемной теплоемкости горной породы и воды  $\rho_m \cdot c_m$  и  $\rho_w \cdot c_w$ , соответственно. Первые определяются по данным лабораторных измерений тепловых свойств горных пород, выполняемых на образцах горных пород, поднятых при бурении скважин. Удельная же и объемная теплоемкость воды (в среднем 4200 Дж/(кг·град)) является параметром, незначительно зависящим от температуры (Кошкин, Ширкевич, 1976).

Данные, необходимые для оценки ресурсов геотермальной энергии с помощью описанной методики, не требуют проведения специальных тестов скважин. Они доступны из литолого-стратиграфического описания разреза, информации по пористости образцов горных пород, каротажных диаграмм и термограмм скважин. По этой причине, а также с учетом того, что эта методика повсеместно применяется в странах Западной Европы, она использована нами в дальнейших расчетах ресурсов геотермальной энергии.

Плотность ресурсов геотермальной энергии зависит от температуры на кровле геотермальных горизонтов. Эта температура, в свою очередь, зависит от глубины залегания геотермальных горизонтов и по мере их погружения увеличивается. Поэтому, следует ожидать, что меньшим глубинам будет соответствовать меньшая плотность ресурсов, которая будет увеличиваться для более глубоких горизонтов. Рассмотрим, прежде всего, глубокие геотермальные горизонты с тем, чтобы получить «верхнюю оценку» плотности геотермальных ресурсов в изучаемом регионе.

Наибольшее количество глубоких скважин было пройдено при выполнении разведочно-картировочного бурения в пределах Кустинской и позднее – Прибугской структур. Кроме этого, в урочище Скверики была пробурена глубокая скважина для поисков минеральных вод, по которой был выполнен термокартаж. Для вычисления плотности ресурсов геотермальной энергии необходимы сведения о плотности и открытой пористости горных пород. Для Кустинской опорной скважины (Синичка и др., 1969) Подляско-Брестской впадины они составляют  $2,58-2,89 \text{ г/см}^3$  и  $3,3 - 7,2\%$ , соответственно.

Глубокие скважины неравномерно распределены по площади региона. Практически во всех глубоких скважинах вскрыты кембрийские отложения, либо поверхность кристаллического фундамента.

Полный разрез отложений протерозоя (вендский комплекс, гдовская свита, пинская свита) вскрыты только частью скважин, поэтому для расчетов ресурсов геотермальной энергии остановимся на рассмотрении кембрийского геотермального комплекса.

*Верхнекембрийские отложения* изучены более детально по сравнению с отложениями протерозоя. Они сложены высокопористыми, хорошо проницаемыми песчаниками с прослоями алевролитов и глин. По данным опробования Кустинской опорной скважины (инт. 935 – 950 м) воды верхнего кембрия характеризуются следующими параметрами: суточный дебит –  $525 \text{ м}^3$  при динамическом уровне 200 м; пластовое давление на глубине 942 м – 93.5 атм, пластовая температура на глубине 942 м –  $31 \text{ }^\circ\text{C}$ ; статический уровень – 5.57 м от устья; удельный вес воды –  $1 \text{ г/см}^3$ . Воды верхнего кембрия практически пресные, их минерализация составляет  $0.362 - 1.366 \text{ г/л}$  (Станкевич,

2004).

*Воды среднего кембрия.* Водоносные кварцевые песчаники отличаются хорошими коллекторскими свойствами. В опорной скважине опробован интервал 1078 – 1090 м. Воды имеют следующую характеристику: суточный дебит  $525 \text{ м}^3$  при динамическом уровне 200 м; пластовое давление – 108 атм; статический уровень – 6.5 м от устья скважины; плотность воды – 1 г/л. Скважина Кустинская 9 испытывалась в интервале 953 – 1052 м (средний кембрий совместно с верхней частью «синих» глин). За 7 минут получен приток воды с расчетным дебитом  $245 \text{ м}^3/\text{сутки}$  при динамическом уровне 776 м (Станкевич, 2004). Минерализация вод среднего кембрия – 0.242 – 1.732 г/л.

*Воды нижнего кембрия.* Эти отложения опробованы в Кустинской опорной скважине. Опробовались песчаники надляминаритового горизонта, заключенного между «синими глинами» и ляминаритовыми глинами в интервале 1265 – 1272 м. Полученная пластовая вода характеризуется следующими параметрами: суточный дебит –  $393 \text{ м}^3$  при динамическом уровне 200 м; пластовое давление на глубине 1282 метра – 128.5 атм; пластовая температура –  $36^\circ\text{C}$ ; статический уровень – 3.85 м от устья; минерализация – 1.72 г/л (Станкевич, 2004). По классификации К.Ф. Богородицкого (Богородицкий, 1968), подземные воды кембрийского комплекса относятся к теплым ( $20 - 37^\circ\text{C}$ ) и горячим ( $37 - 50^\circ\text{C}$ ), а воды верхних горизонтов (см. рис. 2) – к холодным ( $10 - 20^\circ\text{C}$ ).

### **Плотность ресурсов геотермальной энергии кембрийский геотермального комплекса**

Исходные данные, использованные для расчетов, и полученные результаты представлены в таблице 1. Вычисления выполнены с использованием приведенных выше формул (1 – 4). Значение объемной теплоемкости горных пород принято равным  $3.5 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$  по осредненным результатам ее измерения на образцах горных пород, отобранных из Кустинской опорной скважины, а объемной теплоемкости воды –  $4.18 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ . Пористость принята равной 15%, хотя она может достигать по отдельным образцам песчаника более 20-25%.

Таблица 1 - Результаты расчета плотности ресурсов геотермальной энергии кембрийского геотермального комплекса. Коэффициент извлечения  $R_0$  принят равным 0,33.

№ п/п	Название и номер скважины	Глубина до кровли (Н), подошвы (Н <sub>б</sub> ), м	Мощность пласта Δz, м	Темпер. кровли (Т <sub>т</sub> )/подошвы (Т <sub>б</sub> ), °C	Тепло в породах Н <sub>0</sub> , Дж	Плотность ресурсов Н <sub>1</sub> геотерм. энергии, Дж/м <sup>2</sup>	Плотность ресурсов Н <sub>1</sub> , кг.у.т./м <sup>2</sup>
1	Кустинская 1оп	935/1290	355	29.6/37.9	2.63E+10	1.04E+10	353

2	Скверики 1	622/1023	401	22/27	1.88E+10	8.1E+09	276
3	Гирск 6	160/219	59	10.7/11.5	3.61E+8	4.0E+8	14
4	Черняны 22К	220/300	80	11.5/12.5	7.21E+8	6.18E+8	21
5	Ратайчицы 12К	1060/1280	220	30.9/35.2	1.74E+10	6.77E+9	230
6	Курница 9К	770/1140	370	26.3/36.5	2.31E+10	9.37E+9	319
7	Страдечь 17К	380/816	436	17.7/24.4	1.37E+10	6.58E+9	224
8	Брест 1ж.д.	625/1015	390	22/25.8	1.83E+10	7.88E+9	268
9	Орля 28	825/1240	375	28.5/33.8	2.63E+10	1.05E+10	356
10	БЭМЗ-3,4	760/1110	350	23.7/27.1	1.85E+10	7.78E+9	265
11	Каменный мост 28Во	257/335	78	10.3/11.6	3.71E+8	4.93E+8	17
12	Пружаны 9*	232/245	13	12.3/12.6	1.44E+8	1.05E+8	4
13	Домачево 1	349/427	78	14.7/16.3	1.6E+9	8.99E+8	31
14	Прибугская 26К	865/1240	375	28.5/33.8	2.63E+10	1.05E+10	356
15	Прибугская 40	865/1240	375	26/32.4	2.3E+10	9.36E+9	318
16	Прибугская 53	865/1240	375	25.7/32.6	2.26E+10	9.23E+9	314
17	Трухоновичи 2Во	218/348	130	10.9/13.1	8.9E+8	9.12E+8	31
18	Новоселки 41Во	184/282	98	9.4/10.4	1.41E+8	5.13E+8	17
19	Высокое 10К	1070/1310	240	27.1/31.3	1.56E+10	6.31E+9	214
20	Кобрин 4К	324/460	136	13.3/15.8	2.11E+9	1.34E+9	46
21	Берестье 4	Отложения кембрия отсутствуют			0	0	0
22	Дрогичин 6КЦ	Отложения кембрия отсутствуют			0	0	0

- Бурением вскрыта только часть кембрийских отложений.

Температура обратной закачки отработанных вод диктуется требованием отсутствия выпадения растворенных в термальной воде солей после отбора из неё тепла. Как отмечалось, на Клайпедской геотермальной станции она принята равной 11°C, при минерализации рассола около 60-70 г/л. В Подляско-Брестской впадине на глубине залегания кембрийского горизонта воды практически пресные и эта температура может быть меньшей. Нами принято значение 5 °С при среднегодовой температуре местности – 9°С. В правой колонке таблицы 1 приведена плотность ресурсов в килограммах условного топлива (кг.у.т.) на 1 квадратный метр земной поверхности. Переводной коэффициент составляет  $k = 0.034 \cdot 10^{-9}$  т.у.т./Дж (Дядькин и др., 1991, с.170). Другими словами – для производства 1 Дж тепловой энергии необходимо затратить  $0.034 \cdot 10^{-9}$  т.у.т.

Глубокие скважины, по которым выполнены геотермические исследования, рассредоточены вдоль Белорусско-Польской границы. По сути, такое расположение не позволяет построить площадную схему распределения плотности ресурсов геотермальной энергии по белорусской части впадины. Поэтому для нескольких глубоких скважин ПБВ, по которым не выполнялась регистрация их собственных термограмм, были использованы термограммы ближайших скважин. В частности, для скважин Черняны 22К применена термограмма скважины Гирск 6К; для скв. Ратайчицы 12К - Прибугская 12; для скв. Курница 9К – Брест 9Ш; для скв. Страдечь 17К и БЭМЗ 3,4 – Скверики 1; для скв. Орля 28 и Прибугская 26К – Прибугская 22Р; для скв. Новоселки 41Во – Новоселки 27; Кобрин

4К – Брилево 2 и Брилево 3. В ряде случаев, когда имеющиеся термограммы не перекрывали весь интервал кембрийских отложений, использовалась линейная экстраполяция для определения температуры подошвы этого горизонта.

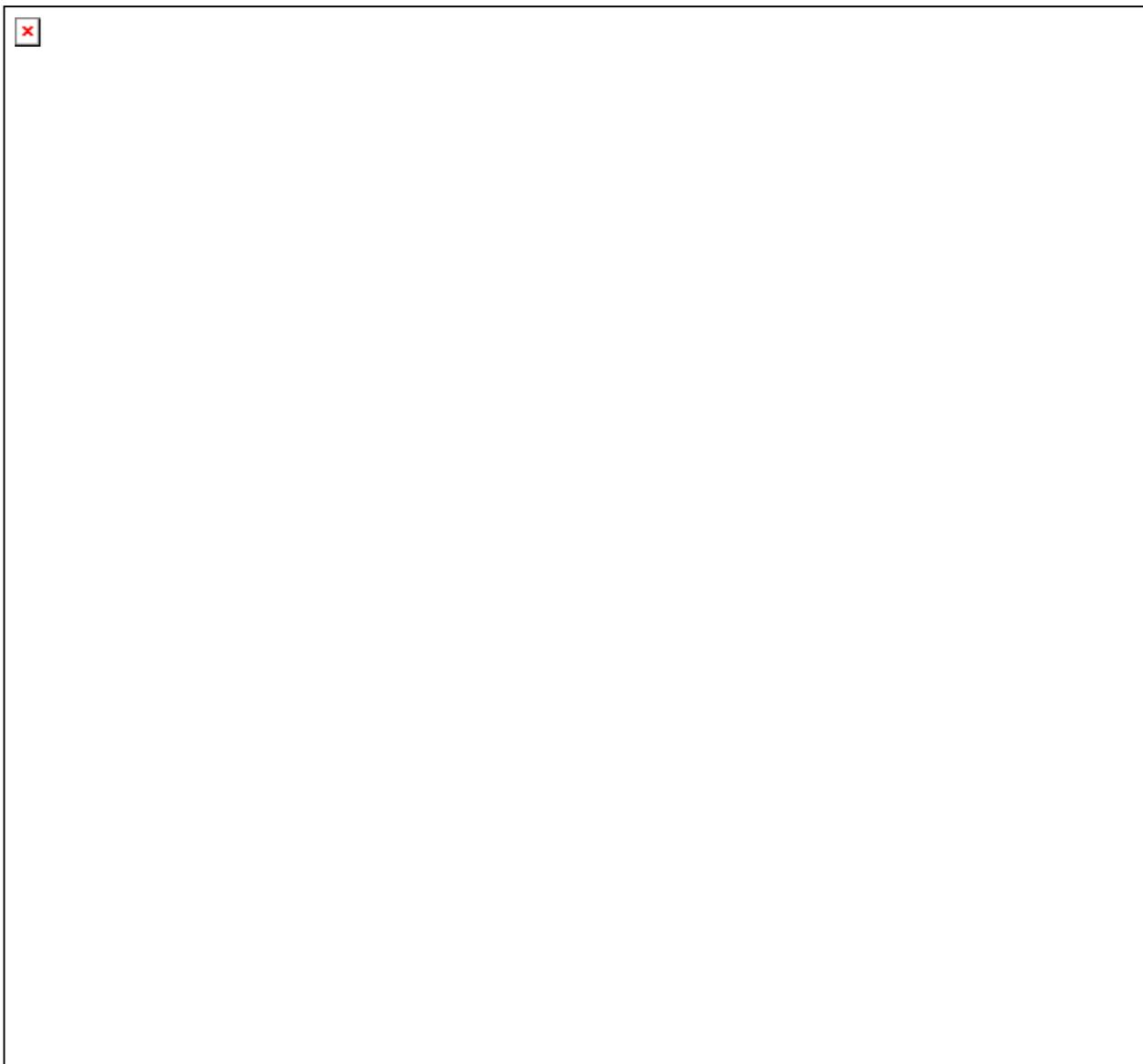


Рисунок 6 - Схема распределения плотности ресурсов геотермальной энергии, заключенной в горных породах кембрийского геотермального горизонта восточной части Подляско-Брестской впадины.

Обозначения: красной линией изображена граница ПБВ; черными линиями показаны основные разломы. Изолинии плотности ресурсов оцифрованы в кг.у.т./м<sup>2</sup>.

Схема распределения плотности ресурсов геотермальной энергии в кембрийских отложениях изучаемого региона представлена на рисунке 6. Севернее линии, проходящей через населенные пункты Каменец, Каменюки, Пружаны, Косово, изолинии плотности ресурсов экстраполированы, кроме того, эта территория находится на границе распространения отложений кембрийского возраста.

Плотность ресурсов геотермальной энергии в кембрийских отложениях изучаемого региона изменяется в широких пределах, от 0 до более чем 350 кг.у.т./м<sup>2</sup>. Максимальные значения наблюдаются северо-западнее Бреста на участке, прилегающем к Белорусско-Польской границе, в частности, в пределах хорошо изученной в геотермическом отношении Прибугской структуры. По направлению к внешним границам впадины происходит снижение плотности ресурсов подземного тепла. Оно обусловлено как уменьшением глубины залегания кембрийских отложений (следовательно, и температуры на их кровле и подошве), так и снижением их мощности. Нулевые значения наблюдаются в полосе вдоль границы Подляско-Брестской впадины с Белорусской антеклизой, Полесской седловиной и Лукувско-Ратновским горстом, где кембрийские отложения выклиниваются, и происходит значительное уменьшение мощности платформенного чехла. В районе крупного промышленного центра – г. Бреста плотность ресурсов подземного тепла заключена в интервале 250 - 300 кг.у.т./м<sup>2</sup>. Однако, следует отметить, что эти данные являются предварительными, поскольку на территории самого города отсутствуют надежные измерения распределения температуры по всему геологическому разрезу имеющихся глубоких скважин, пробуренных Геологическим управлением «Геокаптажминвод» (г. Львов, Украина), в частности, на территории Брестского электромеханического завода (№ 3 и № 4), санатория-профилактория Брестского отделения Белорусской железной дороги (№ 1 и № 2) и Брестского завода безалкогольных напитков (№ 5).

В южной части впадины, в направлении Лукувско-Ратновского разлома происходит быстрое снижение плотности ресурсов подземного тепла, заключенного в кембрийском геотермальном горизонте, до значений менее 50 кг.у.т./м<sup>2</sup>. Так, в скважинах санатория Берестье кембрийские отложения отсутствуют, а в скважине Домачево 1 их мощность составляет только 78 м и плотность ресурсов снижается до 31 - 50 кг.у.т./м<sup>2</sup>. В районе Кобрина мощность пород кембрия и плотность ресурсов снижаются до 136 м и 46 кг.у.т./м<sup>2</sup>, соответственно. В треугольнике населенных пунктов Каменец – Доброволя – Шерешево геотермически опробованные скважины отсутствуют, и изолинии плотности геотермальных ресурсов представляют результат аппроксимации.

### **Геотермальный потенциал территории и схемы использования подземного тепла**

Результаты подсчета геотермального потенциала (содержание тепла в пределах определенной площади) для западных районов Брестской области приведены в таблице 2. Площадь Брестского района заимствована из (Белорусская..., 1970), Жабинковского – из

(Белорусская..., 1971), Каменецкого – из (Белорусская..., 1972a), Кобринского и Малоритского – из (Белорусская..., 1972б).

Таблица 2 - Геотермальный потенциал кембрийского геотермального комплекса для западных районов Брестской области.

Район	Площадь района, км <sup>2</sup>	Средняя плотность геотермальных ресурсов, т.у.т./м <sup>2</sup>	Геотермальный потенциал, т.у.т.	Примечание
Брестский	1617	0,25	4,0425E+8	
Жабинковский	700	0,175	1,225E+8	
Каменецкий	1690	0,25	4,225E+8	Площадь взята по уточненным данным
Кобринский	2000	0,05	1,0E+8	
Малоритский	1400	0,05	7,0E+7	

Наибольший геотермальный потенциал кембрийского геотермального комплекса наблюдается на территории Каменецкого района ( $4,225 \cdot 10^8$  т.у.т.). Его высокие значения также выявлены в Брестском и Жабинковском районах.

Существует ряд методов извлечения геотермальной энергии как из мелких, так и из глубоких геотермальных горизонтов, использующихся в мире. В подавляющем большинстве случаев используют скважины, как один из элементов так называемых «циркуляционных» установок, в которых тепло, запасенное в горных породах и насыщающих их флюидах, доставляется к наземному оборудованию путем откачки подземных вод, либо рассолов. В этом случае под геотермальными горизонтами понимают водо- и рассолонасыщенные толщи, имеющие сходные геолого-гидрогеологические характеристики а также непроницаемые горные породы, например отложения каменной соли. В первом случае тепло выводится из продуктивных горизонтов откачкой теплых вод, поступающих в циркуляционную систему с тепловыми насосами по схеме закрытого (отработанная вода возвращается в продуктивный пласт), либо открытого контура (отработанная вода на возвращается в подземный горизонт). В случае отбора тепла из сухих горных пород используют схемы со скважинными теплообменниками без непосредственного откачки подземных вод из продуктивных толщ. При этом отсутствует гидравлическая связь ствола скважины с массивом вскрытых горных пород. Передача тепла в скважину происходит путем кондуктивного механизма теплообмена между нагретым массивом горных пород и прокачиваемым через скважину флюидом, чаще всего

– воды. Под геотермальным горизонтом в обоих случаях понимают толщу горных пород, от которой происходит основной отбор тепла и его передача в скважину.

Еще одним способом отбора тепла являются грунтовые теплообменники, передача тепла от горных пород в циркуляционный контур, где циркулирует низкозамерзающая жидкость, например этиленгликоль, происходит путем кондуктивного теплообмена. Такие контуры заглубляют на 2 – 3 метра под растительно-почвенным слоем.



Рисунок 7 - Основные схемы извлечения тепла из грунта с использованием вертикальной (А) и горизонтальной (Б) схем, либо скважин в схеме закрытого (В), либо открытого (Г) циркуляционного контура.

Обозначения: красным изображена теплонасосная установка. Контурсы дома изображают потребителя тепла.

Открытые системы рассчитаны на использование теплой пресной, либо подземной воды из водоносного горизонта. Они требуют строительства двух скважин. Одна из них (продуктивная) используется для отбора воды, а вторая (нагнетательная) - для закачки охлажденной воды в тот же водоносный горизонт после отбора от нее тепла тепловым насосом. В закрытом циркуляционном контуре через одну скважину отбирается горячая, как правило, с высокой минерализацией вода из глубокого геотермального горизонта. Она поднимается на поверхность, а после съема с нее тепла посредством теплового насоса, остывший рассол через другую скважину возвращается в геотермальный горизонт.

Имеются и другие разновидности циркуляционных систем. Во всех случаях, они обеспечивают необходимый расход теплоносителя, пропускаемого через тепловой насос (Kohl et al, 2000; Rybach et al, 2000).

Вертикальные циркуляционные системы требуют отвода лишь небольшого участка земли для строительства скважин, горизонтальные системы требуют отвода большей площади земельного участка.

В настоящее время в Беларуси используется лишь несколько теплонасосных установок на водозаборах г. Минска, использующих тепло подземных вод (Жидович, 1998; Жидович, Белый, 2003). Их инсталлированная тепловая мощность не превышает 1 МВт.

### **Заключение**

Ресурсы подземного тепла, как видно из таблицы 2 и карты (рисунок 6), представляют определенный интерес для практического использования. Плотность ресурсов геотермальной энергии кембрийского комплекса изменяется в широких пределах от 0 до 350 кг.у.т./м<sup>2</sup>. Его геотермальный потенциал в западной части ПБВ огромен (табл. 2). Он достигает наибольших значений в приграничной с Польшей полосе в Брестском и Каменецком районах. Эти районы представляют первоочередной интерес для практического использования геотермальной энергии. В направлении к периферии впадины геотермальный потенциал заметно уменьшается.

\* \* \*  
\*

Настоящая работа выполнена частично в рамках гранта Х06Б-002/2.

Автор благодарит А.В. Кудельского и Л.А. Цыбулю за конструктивные предложения, высказанные при чтении рукописи и способствовавшие улучшению данной статьи.

### **Список использованных источников**

- Архангельский А.Д.** Геологическое строение и геологическая история СССР. Т.1. М., 1947;. Т. 2, 1948.
- Белорусская советская энциклопедия (БелСЭ).** Т. 2. Мн., 1970
- Белорусская советская энциклопедия (БелСЭ).** Т. 4. Мн., 1971
- Белорусская советская энциклопедия (БелСЭ).** Т. 5. Мн., 1972
- Белорусская советская энциклопедия (БелСЭ).** Т. 6. Мн., 1972
- Богомолов Г.В.** Геологические структуры и краткая характеристика дочетвертичного и современного рельефа // Геология и полезные ископаемые БССР. 1946. № 1. С. 3-22.
- Богомолов Г.В., Силин-Бекчурин А.И., Духанина В.И., Панов В.В., Богомолов Ю.Г.** Гидрогеология, гидрохимия, геотермия геологических структур. – Мн., 1971.
- Богородицкий К.Ф.** Высокотермальные воды СССР. М., 1968.

- Богуславский Э.И.** Техничко-экономическая оценка геотермальных ресурсов. С.-Пб., 1984.
- Бондаренко Б.В., Хотько Ж.П.** Основные черты тектоники Брестской впадины // Тр. ИГН АН БССР. Вып.3. Мн., 1961. — С. 93-107.
- Вайнблат А.Б., Шувалов Ю.В. и др.** Предварительная оценка надежности геотермальной информации в геолого-экономических расчетах геотермальных ресурсов // Физические процессы в горном деле. С.-Пб., 1982.
- Геология Беларуси** Под ред. А.С. Махнача, Р.Г. Гарецкого, А.В. Матвеева и др. Мн., 2001.
- Геология СССР. Т. III. Белорусская ССР. Геологическое описание.** М., 1971.
- Горелик З.А.** Данные по тектонике Белоруссии и проблема выявления месторождений соли и нефти на ее территории. 1947.
- Дядькин Ю.Д.** Основы геотермальной технологии. С.-Пб., 1985.
- Дядькин Ю.Д., Богуславский Э.И., Вайнблат А.Б., Остроумова И.М., Троицкая Е.Б., Моисеенко У.И.** Геотермальные ресурсы СССР. С.-Пб., 1991. - С. 168-176.
- Жидович И.С.** Применение тепловых насосов на промышленных предприятиях // Энергоэффективность. 1998. № 8. С. 9-11.
- Жидович И.С., Белый В.Я.** Применение тепловых насосов для теплоснабжения объектов ВКХ городов // Энергия и менеджмент. 2003. № 5(14). С. 39-41.
- Жирмунский А.М.** Основные черты тектоники Западного края // Изв. Московского отделения Геологического комитета. 1919. Т. 1. – С. 205-226.
- Жирмунский А.М.** Подземные воды Западного края // Материалы по общей и прикладной геологии. Вып. 63. М., 1927.
- Зиновенко Г.В.** Балтийско-Приднестровская зона перикратонных опусканий / Под ред. Р.Г. Гарецкого. Мн., 1986.
- Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.** Справочник по элементарной физике. М., 1976.
- Кудельский А.В.** Проблемы водных ресурсов, геотермии и геоэкологии // Материалы Международной научной конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Г.В. Богомоллова. Т. 1. Мн., 2005. – С. 125-128.
- Кудельский А.В., Пашкевич В.И., Карабанов А.К., Павловская И.Э., Коркин В.Д.** Гидросфера Беларуси на новейшем тектоническом этапе // Докл. НАН Беларуси. 2000, Т. 44, № 6, С. 79-83.
- Кудельский А.В., Пашкевич В.И., Ясовеев М.Г.** Подземные воды Беларуси. Мн., 1998.
- Махнач А.С.** Древнепалеозойские отложения Белоруссии. Мн., 1958.
- Международная тектоническая карта Европы.** Масштаб 1: 2500000. М., 1964.
- Основы геологии Беларуси /** Под ред. А.С. Махнача, Р.Г. Гарецкого, А.В. Матвеева, Я.И. Аношко. Мн., 2004.
- Синичка А.М., Зиновенко Г.В., Бессонова В.Я., Жицкая З.В. и др.** Сводный отчет по опорной скважине Кустинская № 1 Брестской впадины. Мн., 1969.
- Синичка А.М., Зиновенко Г.В., Бессонова В.Я., Жицкая З.В.** Кустинская опорная скважина Брестской впадины. М., 1970.
- Станкевич Р.А.** Артезианские воды Бреста и их использование. Мн., 2004.
- Шатский Н.С.** О тектонике Восточно-Европейской платформы // Бюлл. МОИП. Отд. Геол., 1937. – Т.15. – Вып. 1. – С. 4-26.
- Franko O., Kral M.** Hydrogeothermics in Czechoslovakia. // Hydrogeothermics. International Association of Hydrogeologists. / (Eds. Jean-Jacques Risler, Ian Simmers), 1994. vol. 15. – P. 21-42.
- Hurter S., Haenel R.** (Eds.). Atlas of Geothermal Resources in Europe. Leibnitz Institute for Applied Geosciences (GGA), Hannover, Germany, 2002. 92 p. + 89 Plates.
- Kohl T., Salton M., Rybach L.** Data Analysis of the Deep Borehole Heat Exchanger Plant Weissbad (Switzerland) // Proceedings of the World Geothermal Congress, Kyushu – Tohoku, Japan, 2000, May 28 - June 10. 2000. Kyushu – Tohoku, p. 3459-3464.

- Rybach L., Brunner M., Gorhan H.** Swiss Geothermal update 1995-2000 // Proceedings of the World Geothermal Congress, Kyushu – Tohoku, Japan, 2000, May 28 - June 10. 2000. Kyushu – Tohoku, p. 413-426.
- Sliaupa S., Rasteniene V., Lashkova L.** Cambrian Geothermal aquifer of Lithuania. Międzynarodowe seminarium na temat: Rola energii geotermalnej w zrównowazonym rozwoju regionów Mazowieckiego i Łódzkiego. Osuchów 4-6 października 2000 r. Kraków, 2000. – S. 41-55.

## Рэзюме

У артыкуле адлюстраваны галоўныя звесткі аб геатэрмічных умовах усходняй часткі Падляска-Брэсцкай упадзіны ў межах Беларусі. Разгледжана структура геатэмпэратурнага поля на глыбіні 300 метраў, выканана ацэнка шчыльнасці рэсурсаў геатэрмальнай энергіі. Важны ўплыў на назіраемую структуру размеркавання тэмпературы мае фільтрацыя падземных вод у верхняй частцы платформеннага чохла, перш-наперш – у зоне актыўнага водаабмену. Вызначаны вынікі разлікаў геатэрмальнага патэнцыялу для геатэрмальнага комплексу кембрыійскіх адкладаў. Уся тэрыторыя беларускай часткі Падляска-Брэсцкай упадзіны цалкам вызначае зацікаўленасць для практычнага выкарыстання цяпла зямных нетраў, аднак найбольшыя рэсурсы падземнага цяпла існуюць у заходняй частцы рэгіёну на тэрыторыі Брэсцкага, Камянецкага і Жабінкаўскага раёнаў, у тым ліку і ў ваколіцах Брэста, Камянца, Высокага. У прыгранічных з Польшчай раёнах, дзе павялічваецца магутнасць платформеннага чохла, павялічваецца тэмпература ў пагружаных ваданосных гарызонтах. Гэта ўплывае на павелічэнне шчыльнасці рэсурсаў геатэрмальнай энергіі да 300 - 350 кілаграм умоўнага паліва на квадратны метр. Першачарговымі раёнамі для практычнага выкарыстання падземнага цяпла з'яўляюцца Брэсцкі, Камянецкі і Жабінкаўскі. Практычна паўсюдна будаўніцтва геатэрмальнага ўстановак дазволіць выкарыстаць прыродныя рэсурсы геатэрмальнай энергіі для мэты ацяплення жылых і вытворчых будынкаў, аб'ектаў аграпрамысловага комплексу, у тым ліку і аграгарадкоў, якія будуецца. Спрыяльным момантам для выкарыстання падземнага цяпла ва ўпадзіне з'яўляецца нізкая мінералізацыя падземных вод на значных глыбінях да 1000 – 1100 метраў.

## **Abstract**

The main results, concerning geothermal conditions of the eastern part of the Podlaska-Brest Depression within margins of Belarus are described in the article. The structure of the terrestrial temperature field at the depths of 300 meters is considered, estimates of the density of geothermal resources were fulfilled. The groundwater filtration existing within upper parts of the sedimentary rock sequence, and first of all, within the zone of active water exchange has an important influence for the observed pattern of the temperature distribution within the platform cover. Results of the geothermal energy potential for the Cambrian geothermal complex were calculated. It was shown that the whole area of the Byelorussia part of the Podlaska-Brest Depression represents an interest for practical utilization of the heat accumulated in the platform cover. The highest resources of the underground heat exist within territories of the Brest, Kamenets, and Zhabinka districts including the vicinity of Brest, Kamenets, Vysokoye towns. In the area, adjoining the Belarus – Poland border, where the thickness of the platform cover increases sufficiently, the temperature in deepening strata is higher as well. It results in synchronous growth of the density of geothermal energy resources up to 300 – 350 kilograms of oil equivalent (kg.o.e) for one square meter. The top-priority districts to practical utilization of underground heat resources are the Brest, Kamenets, and Zhabinka districts. The construction of geothermal installations within these districts gives a possibility to use natural resources of geothermal energy for heating of dwellings and industrial buildings, farm building of agricultural complex, as well as farm settlements, which are under construction now all over the country. One of favourable conditions to use underground heat within the Podlaska-Brest Depression area is low dissolved chemical content in warm groundwater saturating porous rocks at sufficient depths up to 1,000 – 1,500 meters.

The underlying Proterozoic complex of rocks exhibits the temperature higher than the Cambrian one and it reaches up to 40-41 °C, but many of boreholes here open only a part of the Proterozoic sedimentary rock sequence and did not reach the base of this complex. In result, the geothermal energy resources were not estimated for the whole Proterozoic thickness of sediments. The resources of geothermal energy resources contained in shallower horizons are much lower but still represent the interest for their practical utilization.