

УДК 550.36

СТРУКТУРА ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО АТЛАСА БЕЛАРУСИ

М. А. ДУБАНЕВИЧ¹⁾, В. И. ЗУЙ²⁾, О. А. МАРТЫНОВА¹⁾

¹⁾Научно-практический центр по геологии, ул. Купревича, 7, 220141, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Геотермические исследования в Беларуси начаты в начале 1960-х гг. К настоящему времени накоплен значительный материал по тепловому режиму платформенного чехла страны – термограммы скважин, данные по тепловым свойствам горных пород, плотности теплового потока, извлекаемым ресурсам подземного тепла. Результаты многолетних исследований отражены в обобщенном виде в Геотермическом атласе, который включает серию геотермических карт: 10 сводных карт для всей территории и 16 карт дополнительно для наиболее изученного осадочного бассейна республики – Припятского прогиба. Они отражают значительный контраст геотермического поля страны. В атлас, издаваемый впервые, входит каталог плотности теплового потока Беларуси, составленный в формате, рекомендованном Международной комиссией по тепловому потоку. Он содержит данные по 497 изученным скважинам. Атлас включает карты распределения температуры на глубинах 100; 200; 300; 400 и 500 м для всей территории страны и для наиболее изученного в геотермическом отношении Припятского прогиба; карты распределения температуры на глубинах 1; 2; 3 и 4 км, а также карты для поверхности стратиграфических толщ Припятского прогиба – поверхности верхней соли, межсолевых отложений, поверхности нижней соли, подсолевого карбонатного и подсолевого терригенного комплексов; карты геотермического градиента в интервалах глубины 100–200 и 200–300 м для всей территории Беларуси и карту плотности теплового потока, построенную с использованием каталога теплового потока; карты плотности извлекаемых ресурсов геотермальной энергии для интервалов глубины 100–200 и 200–300 м, а также для надсолевой толщи отложений девонского возраста.

Ключевые слова: геотермия; температура; тепловой поток; геотермический атлас; геотермические карты; геотермальные ресурсы.

STRUCTURE OF THE GEOTHERMAL ATLAS OF BELARUS

M. A. DUBANEVICH^a, V. I. ZUI^b, O. A. MARTYNOVA^a

^aScientific Research Center for Geology, 7 Kuprevič Street, Minsk 220141, Belarus

^bBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: V. I. Zui (zui@bsu.by)

Geothermal investigations in Belarus were started in the beginning of sixties of the past century. A considerable geothermal data were accumulated until present time on the thermal regime of the platform cover within the country – thermograms of boreholes, thermal properties of rocks, heat flow density, data on the recoverable resources of an underground

Образец цитирования:

Дубаневич МА, Зуй ВИ, Мартынова ОА. Структура Геотермического атласа Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2018;2: 74–85.

For citation:

Dubanevich MA, Zui VI, Martynova OA. Structure of the Geothermal Atlas of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2018;2:74–85. Russian.

Авторы:

Маргарита Анатольевна Дубаневич – магистр геолого-минералогических наук; научный сотрудник отдела геофизики филиала «Институт геологии».

Владимир Игнатьевич Зуй – доктор геолого-минералогических наук, доцент; профессор кафедры региональной геологии географического факультета.

Ольга Александровна Мартынова – младший научный сотрудник отдела геофизики филиала «Институт геологии».

Authors:

Marharita A. Dubanevich, master of science (geology and mineralogy); researcher at the department of geophysics of the branch «Institute of Geology».

nenuiall@gmail.com

Vladimir I. Zui, doctor of science (geology and mineralogy), docent; professor at the department of regional geology, faculty of geography.

zui@bsu.by

Olga A. Martynova, junior researcher at the department of geophysics of the branch «Institute of Geology».

o.al.martynova@gmail.com

heat. Results of long-term investigations are reflected in generalized form in the published Geothermal Atlas as a series of geothermal maps described by a brief accompanying text. The Geothermal Atlas was published for the first time; it includes 10 summary maps for the whole territory of the country and 16 maps additionally for the best-studied sedimentary basin of the republic, which is the Pripyat Trough. They reflect a considerable contrast of the geothermal field within the country. The heat flow catalogue for Belarus is included into the atlas. It was prepared according to the format suggested by the International Heat Flow Commission. It includes data on 497 studied boreholes. Maps of the Geothermal Atlas were compiled for following topics: maps of the temperature distribution for depths of 100; 200; 300; 400 and 500 m for the whole territory of the country. They were supplemented for these depths for the territory of the Pripyat Trough, which is best studied in geothermal respect; maps of the temperature distribution for depths of 1; 2; 3 and 4 km, as well as maps for stratigraphic thicknesses of the Pripyat Trough: surfaces of roofs of the Upper Salt, Inter-salt Deposits, the Lower Salt, carboniferous and terrigenous complexes underlying the Lower Salt; maps of geothermal gradients for the depth intervals of 100–200 and 200–300 m for the whole territory of Belarus, the heat flow density map based on the heat flow catalogue, included into the atlas; maps of the recoverable resources of geothermal energy for depth intervals of 100–200 and 200–300 m, as well as for the thickness of the Devonian age overlying the Upper Salt complement this work.

Key words: geothermics; temperature; heat flow; geothermal maps; geothermal atlas; geothermal resources.

Введение

Геотермические исследования в Беларуси ведутся с начала 1960-х гг. Наиболее активная их фаза относится к началу 1970-х гг., когда в Лаборатории геохимических проблем (ЛГП) АН БССР был создан сектор геотермии. В последующие годы как ЛГП, так и ее структурные подразделения претерпели ряд реорганизаций (Институт геохимии и геофизики (ИГиГ), Институт геологии, геохимии и геофизики). В 1990-х гг. ИГиГ был присоединен к Белорусскому научно-исследовательскому геолого-разведочному институту (БелНИГРИ), а впоследствии – к Научно-производственному центру по геологии (НПЦ по геологии). В течение этих лет геотермические исследования проводились регулярно в лаборатории тепломассопереноса в земных недрах, лаборатории геотермии, отделе геотермии. В течение более чем 40 лет накоплен значительный материал по тепловому режиму платформенного чехла Беларуси.

В 2011 г. в БелНИГРИ начаты работы по обобщению накопленного материала, одной из целей которых являлось создание Геотермического атласа Беларуси. При его составлении использованы как данные регистрации распределения температуры по глубине скважин различного назначения, так и данные по определению геотермического градиента на различных интервалах глубины, а также определения плотности теплового потока.

До распада Советского Союза геотермические исследования выполнялись на территории Беларуси, Литвы, Латвии, Эстонии и в западных областях России [1], после – только в пределах республики. В этот период проведены работы по оценке плотности извлекаемых ресурсов геотермальной энергии. Подготовленный атлас отражает в обобщенном виде результаты, полученные большим коллективом геотермиков страны за многие годы. Общее редактирование атласа выполнено профессором В. И. Зуем, формулировавшим тематику геотермических исследований в стране на протяжении более 35 лет. Большой вклад в накопление материала (регистрация термограмм скважин, сбор данных промыслового термокаротажа, измерение тепловых свойств образцов горных пород, определение плотности теплового потока) внесли кандидаты наук Л. А. Цыбуля, П. П. Атрошенко, М. Д. Пархомов, П. Б. Цалко, Я. Г. Грибик, А. П. Пинчук; доктора наук В. И. Зуй, В. Г. Левашкевич; в проведении полевых и лабораторных работ значительная доля принадлежит младшим научным сотрудникам М. С. Жуку, А. В. Веселко, В. М. Макаренко, Г. И. Урбану, О. А. Мартыновой. На заключительных стадиях работы над атласом в ней принимали участие выпускники БГУ – магистры М. А. Дубаневич и Е. А. Василёнок. Основной объем графических работ выполнен М. А. Дубаневич. Отдельные аспекты геотермических исследований в стране изложены в монографиях [2–8] и в десятках научных статей.

Работы по созданию атласа [9], начатые в БелНИГРИ в 2011 г., завершены в НПЦ по геологии (после структурных преобразований) в 2015 г.

Краткие сведения о геологическом строении региона

Территория Беларуси расположена в западной части докембрийской Восточно-Европейской платформы. Кристаллический фундамент страны перекрыт платформенным чехлом различной мощности. Наиболее крупными отрицательными структурами являются Оршанская впадина и восточное окончание Подляско-Брестской впадины, а также Припятский прогиб. Фундамент Белорусской антеклизы

перекрыт платформенным чехлом мощностью до 500 м, в пределах Центрально-Белорусского массива его мощность сокращается до 80–100 м. Подавляющее большинство изученных буровых скважин в регионе завершено в платформенном чехле. Лишь в некоторых скважинах геотермические измерения выполнены во вскрытых бурением интервалах кристаллического фундамента.

Центральное место в регионе занимает Белорусская антеклиз. В ее пределах выделены Центрально-Белорусский массив, Воложинский грабен, Вилейский, Бобовнянский, Бобруйский, Ивацевичский и Мазурский погребенные выступы. К антеклизе примыкают отрицательные структуры – Припятский прогиб, Оршанская и Подляско-Брестская впадины, а также Балтийская синеклиза на севере и северо-западе.

Наиболее глубокое погружение кристаллического фундамента (до 5,0–6,4 км) выявлено в отдельных блоках Припятского прогиба (рис. 1). Прогиб расположен между Белорусской антеклизой и Жлобинской седловиной на севере и Украинским щитом на юге. От Днепровско-Донецкой впадины он отделен Брагинско-Лоевской седловиной. На западе Полеская седловина отделяет Припятский прогиб от Подляско-Брестской впадины. По поверхности фундамента прогиб состоит из Припятского грабена и Северо-Припятского плеча, отделенных друг от друга Северо-Припятским краевым

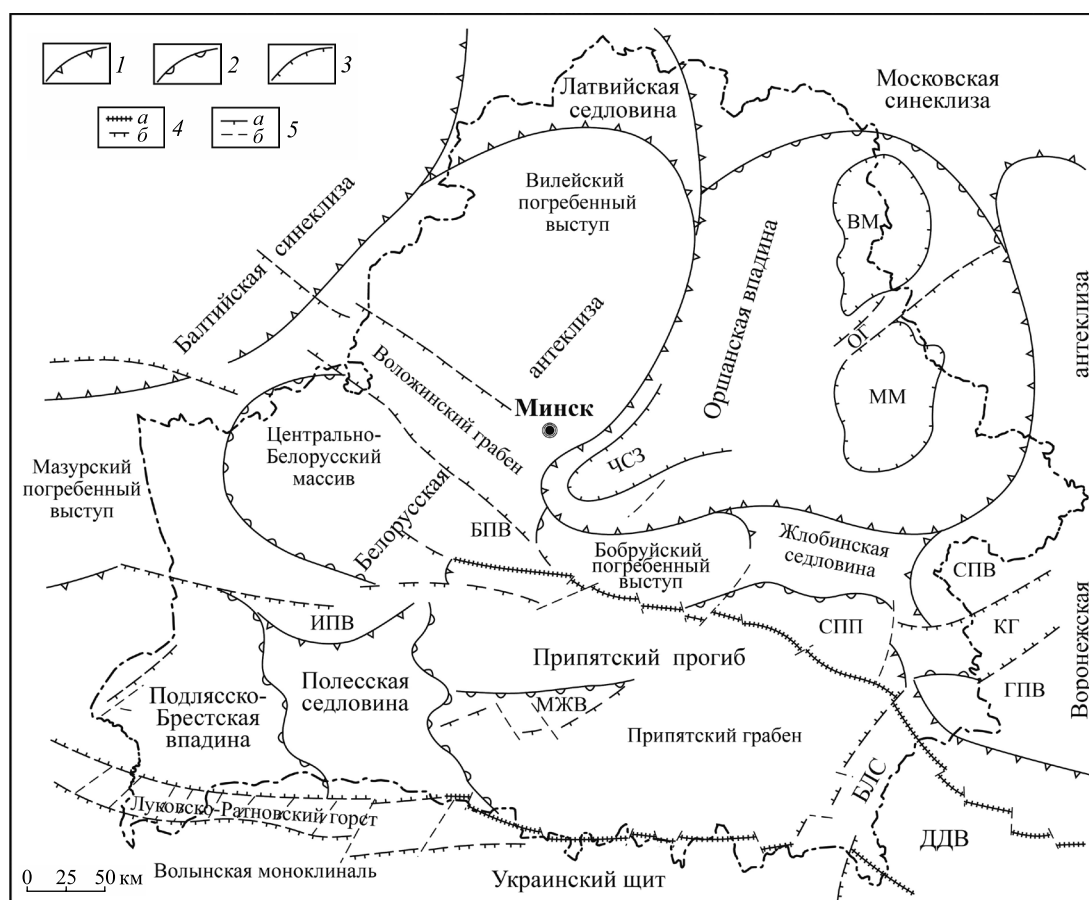


Рис. 1. Тектоническое районирование территории Беларуси (по [10], с упрощениями).

Границы: 1 – структур I порядка; 2 – структур II порядка; 3 – структур III порядка;
 разломы: 4 – суперрегиональные (а) и региональные (б); 5 – субрегиональные (а) и локальные (б).
 БЛС – Брагинско-Лоевская седловина; БПВ – Бобовнянский погребенный выступ;
 ВМ – Витебская мульда; ГПВ – Гремячский погребенный выступ;
 ДДВ – Днепровско-Донецкая впадина; ИПВ – Ивацевичский погребенный выступ;
 КГ – Клинецкий грабен; МЖВ – Микашевичско-Житковичский выступ;
 ММ – Могилевская мульда; ОГ – Оршанский горст; СПВ – Суражский погребенный выступ;
 СПП – Северо-Припятское плечо; ЧСЗ – Червенский структурный залив

Fig. 1. Tectonic zoning of the territory of Belarus (according to [10], simplified).

Margins: 1 – structures of the I order; 2 – structures of the II order; 3 – structures of the III order;
 faults: 4 – super-regional (a) and local (b); 5 – sub-regional (a) and local (b). БЛС – Bragin-Loev Saddle;
 БПВ – Bobovnya Buried Salient; ВМ – Vitebsk Trough; ГПВ – Gremyachi Buried Salient;
 ДДВ – Dnieper-Donets Trough; ИПВ – Ivatsevichi Buried Salient; КГ – Klintzy Graben;
 МЖВ – Mikashevichi-Zhitkovichi Salient; ММ – Mogilev Trough; ОГ – Orsha Horst;
 СПВ – Surazh Buried Salient; СПП – North Pripyat Shoulder; ЧСЗ – Cherven Structural Bay

разломом. На юге Южно-Припятский краевой разлом отграничивает прогиб от Украинского щита. Наиболее активное накопление отложений платформенного чехла в Припятском прогибе имело место в девонское время.

Особенностью строения платформенного чехла Припятского прогиба является наличие двух толщ каменной соли девонского возраста. Их разделяет толща межсолевых терригенных отложений. Нижне-солевая толща подстилается подсолевыми карбонатным и терригенным комплексами отложений, последний перекрывает кристаллический фундамент. В пределах прогиба широко развита соляная тектоника с многочисленными соляными куполами, протяженными соляными валами и межкупольными депрессиями. Фундамент прогиба разбит системой глубоких разломов и имеет блоковое строение.

Оршанская впадина – крупная отрицательная структура на северо-востоке Беларуси [10], является частью протяженного Волынского-Оршанского палеопргиба рифейского возраста. Ее восточное окончание простирается в Россию. Она отделена Латвийской седловиной от Балтийской синеклизы. В ее осевой части выделены Витебская и Могилёвская мульды с глубиной до фундамента 1400–1600 м и более.

Полесская седловина отделяет Припятский прогиб от Подляско-Брестской впадины. На севере она ограничена широтным Свислочским разломом, отделяющим впадину от Белорусской антеклизы, на юге – Луковско-Ратновским горстом. Наибольшая мощность платформенного чехла впадины на территории Беларуси превышает 1500 м (вблизи белорусско-польской границы) [10].

Поверхность кристаллического фундамента приподнята в пределах Микашевичско-Житковичского выступа, который в виде структурного носа Полесской седловины вдаётся далеко в Припятский прогиб. На крайнем юге на территорию Беларуси заходит Украинский щит, на отдельных его участках породы фундамента обнажены. В верхней части платформенный чехол повсеместно обводнен.

Исходные геотермические данные

Построенные геотермические карты атласа в наиболее полной форме отражают достигнутую к настоящему времени изученность региона. Для их составления использовано более 700 термограмм, зарегистрированных в скважинах различного назначения (разведочные, поисковые, гидрогеологические, наблюдательные и др.), величины плотности теплового потока получены по 497 скважинам, также изучены данные о плотности ресурсов подземного тепла по отдельным геотермальным горизонтам.

Построение карт распределения температуры основано на термограммах скважин, при этом важное значение имеет их качество. Используются как диаграммы, зарегистрированные в скважинах, восстановивших тепловое равновесие с массивом прилегающих горных пород после завершения буровых работ, так и ряд производственных измерений (после их тщательного отбора) с нарушенным при бурении тепловым режимом, главным образом по территории Припятского прогиба. Первый тип термограмм преобладал за пределами прогиба, тогда как вторые относились в основном к территории прогиба (рис. 2). На рис. 2 длины вертикальных полосок в масштабе (правый нижний угол карты) показывают глубину, достигнутую электротермометром в скважинах.

Измерение тепловых свойств горных пород – коэффициентов теплопроводности и объемной теплоемкости, необходимых для последующего нахождения плотности теплового потока и ресурсов геотермальной энергии, – выполнено в лабораторных условиях на образцах керна, слагающих изучаемые интервалы глубины. Определение плотности геотермальных ресурсов базировалось на учете распределения температуры на кровле продуктивного горизонта и объемной теплоемкости слагающих разрез литологических толщ [8; 9].

Состав Геотермического атласа Беларуси

Геотермический атлас Беларуси [9] содержит 10 сводных карт для всей территории страны и 16 карт для наиболее изученного осадочного бассейна республики – Припятского прогиба, а также каталог теплового потока Беларуси по состоянию на конец 2017 г., в который включены все определения его значений, выполненные рядом исследователей за все время наблюдения теплового поля территории республики. Общее количество изученных по тепловому потоку скважин – 497.

Несмотря на многолетнее исследование геотермических условий республики, до настоящего времени практически отсутствуют данные по глубоким горизонтам Оршанской впадины. Слабо изучены территории вдоль границ с Литвой, Латвией, Россией. После аварии на Чернобыльской АЭС также не ведется бурение скважин и наблюдение теплового поля в полосе отселения вдоль украинской границы. Остается слабо изученной западная часть Припятского прогиба. Это отражается на надежности картирования указанных территорий.

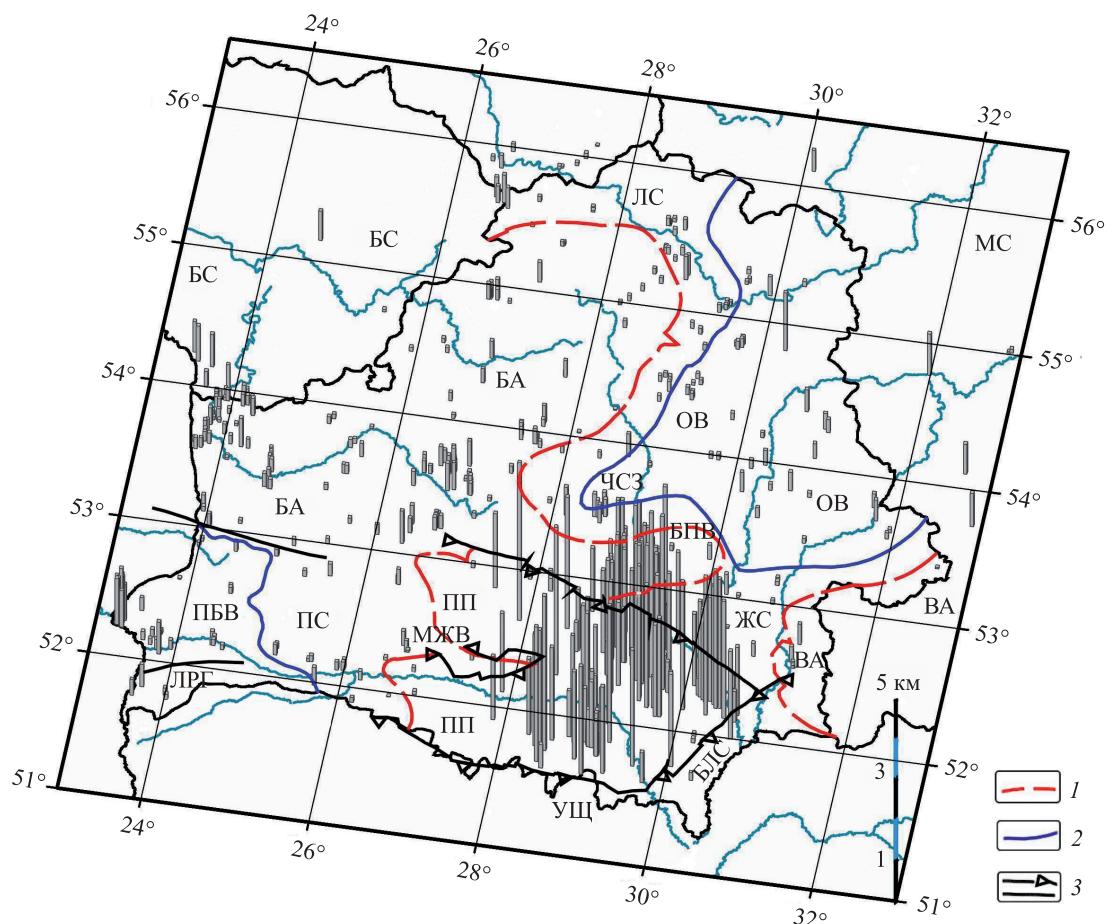


Рис. 2. Расположение и глубины изученных геотермическим методом скважин (по [5]).

Границы: 1 и 2 – положительные и отрицательные структурные элементы чехла соответственно; 3 – Припятского прогиба и пр. БА – Белорусская антеклиз; БЛС – Брагинско-Лоевская седловина; БПВ – Бобруйский погребенный выступ; БС – Балтийская синеклиза; ВА – Воронежская антеклиз; ЖС – Жлобинская седловина; ЛРГ – Луковско-Рагновский горст; ЛС – Латвийская седловина; МЖВ – Микашевичско-Житковичский выступ; МС – Московская синеклиза; ОВ – Оршанская впадина; ПБВ – Подляско-Брестская впадина; ПП – Припятский прогиб; ПС – Полесская седловина; ЧСЗ – Червенский структурный залив; УЩ – Украинский щит

Fig. 2. Schematic map of the position and depths of geothermally studied boreholes (according to [5]).

Margins: 1 – positive; 2 – negative structural elements of the cover; 3 – the Pripyat Trough and others.
 БА – Belarusian Antecline; БЛС – Bragin-Loev Saddle; БПВ – Bobruisk Buried Salient;
 БС – Baltic Syneclise; ВА – Voronezh Antecline; ЖС – Zhlobin Saddle; ЛРГ – Lukow-Ratno Horst;
 ЛС – Latvian Saddle; МЖВ – Mikashевичи-Zhitkovichі Salient; МС – Moscow Syneclise;
 ОВ – Orsha Depression; ПБВ – Podlaska-Brest Depression; ПП – Pripyat Trough;
 ПС – Polesian Saddle; ЧСЗ – Cherven Structural Bay; УЩ – Ukrainian Shield

Геотермический атлас Беларуси включает:

- карты распределения температуры на глубинах 100; 200; 300; 400 и 500 м для всей территории страны. Они дополнены картами распределения температуры на этих глубинах для наиболее изученного в геотермическом отношении Припятского прогиба;
- карты распределения температуры на глубинах 1; 2; 3 и 4 км, а также карты для поверхности стратиграфических толщ Припятского прогиба – поверхности верхней соли, межсолевых отложений, поверхности нижней соли, подсолевого карбонатного и подсолевого терригенного комплексов;
- карты геотермического градиента для интервалов глубины 100–200 и 200–300 м всей территории Беларуси;
- карту плотности теплового потока, построенную с использованием каталога теплового потока, приложенного к атласу;
- карты плотности извлекаемых ресурсов геотермальной энергии для интервалов глубины 100–200 и 200–300 м, а также ресурсов из надсолевой толщи отложений девонского возраста.

Для всей территории страны карты построены в масштабе 1 : 2 000 000, они дополнены картами в масштабе 1 : 800 000 для Припятского прогиба. При построении карт атласа Беларуси были также учтены отдельные термограммы по прилегающим территориям Украины, России, Латвии и Литвы.

Текстовая часть атласа приведена на русском и английском языках. Обозначения населенных пунктов (в основном областных и районных центров) на картах представлены в латинской транслитерации с белорусского языка. Формат атласа – А3. Рассмотрим отдельные виды карт (с упрощениями по отношению к опубликованным в оригинале).

Карта распределения температуры на глубине 100 м

Измерения температуры на глубине 100 м выполнены в большинстве случаев в скважинах, находившихся продолжительное время в покое после завершения буровых работ. Для Припятского прогиба имеются немногочисленные надежные термограммы, поэтому использован ряд термограмм производственного каротажа. Их количество убывает с ростом глубины (рис. 3).

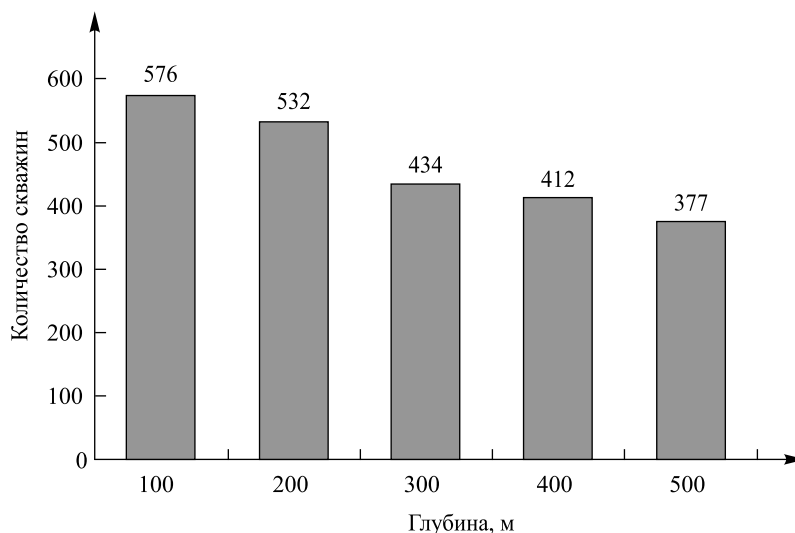


Рис. 3. Гистограмма глубины использованных скважин

Fig. 3. Histogram of depths of used boreholes

Значения температуры для производственных термограмм на глубине 100 м определены путем интерполяции, с опорой на имеющиеся скважины с надежными термограммами, где измерения выполнены скважинными электротермометрами точечным методом с погрешностью 0,03–0,05 °С.

На указанной глубине отчетливо прослеживаются региональные и локальные аномалии, температура в пределах которых изменяется от 7 до 11,5 °С, разница между крайними значениями достигает 4,5 °С (рис. 4). Значения свыше 9 °С характерны для северной зоны Припятского прогиба и Подляско-Брестской впадины, где существуют положительные геотермические аномалии, а также для западного склона Воронежской антеклизы на востоке Беларуси.

В Оршанской впадине изотермой 7,5 °С оконтурена Восточно-Оршанская аномалия низких значений температуры. Западно-Оршанская аномалия ее повышенных величин (от 8 °С в центральной части и до 10 °С в южной части структуры), ориентированная в меридиональном направлении, прослеживается от северной зоны Припятского прогиба через западную часть Оршанской впадины и восточный склон Белорусской антеклизы. Она выделяется по линии Речица – Светлогорск – Березино – Борисов – Лепель – Полоцк. Эта аномалия отделяет восточный склон Белорусской антеклизы и Червенский структурный залив от основной части Оршанской впадины.

Изотерма 9,5 °С окаймляет аномалию повышенных значений температуры Подляско-Брестской впадины и частично – Полесской седловины. Брестская аномалия изолинией 9 °С соединяется через седловину с аномалией повышенной температуры Припятского прогиба, включая Бельничско-Речицкую аномалию и западный склон Воронежской антеклизы.

К юго-востоку от Гродно по линии Волковыск – Мосты изотермой 9 °С оконтурена локальная аномалия повышенных значений температуры. Восточнее по линии Ивацевичи – Дятлово также выделена меридионально ориентированная аномалия с температурой более 9 °С.

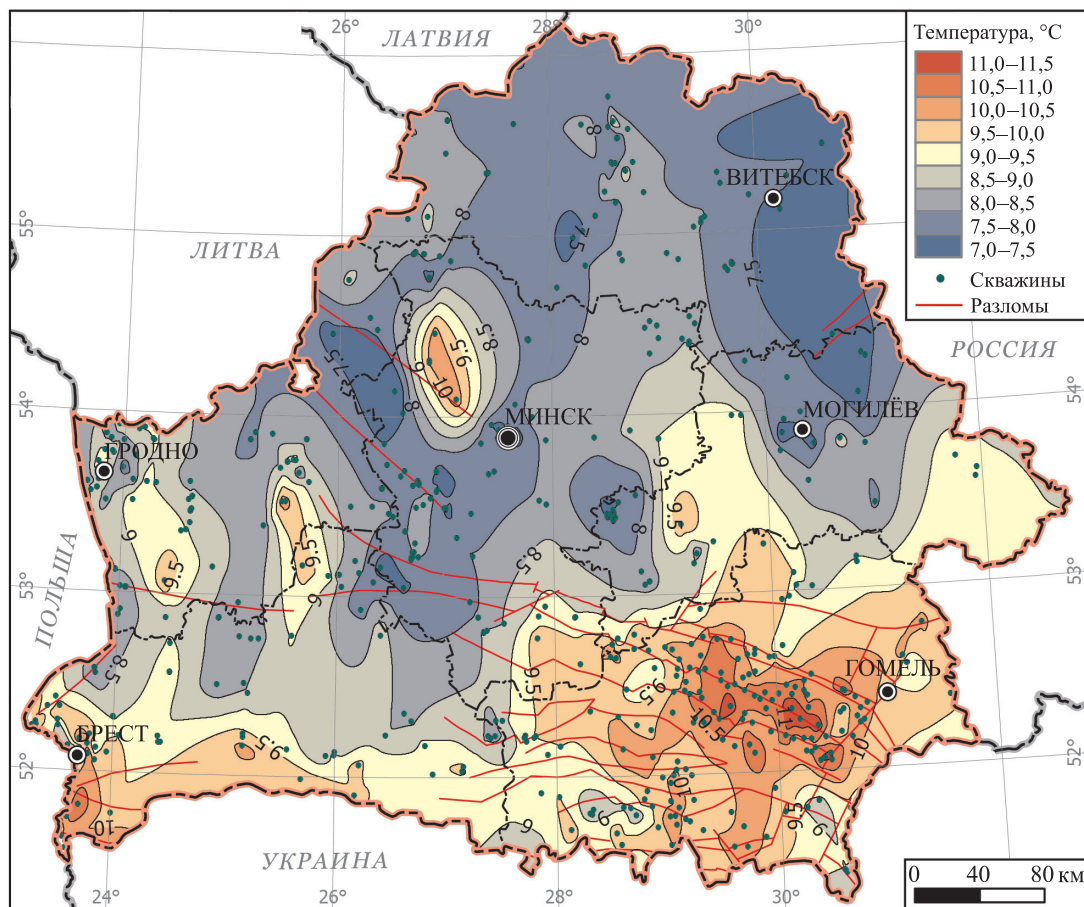


Рис. 4. Карта распределения температуры на глубине 100 м (по [9], с упрощениями)

Fig. 4. Map of the temperature distribution at the depth of 100 m (according to [9], simplified)

Молодечненско-Нарочанская аномалия с величинами температуры свыше 8°C разделяет аномалию пониженных температур Белорусской антеклизы на две части – аномалию северо-восточных склонов антеклизы и аномалию центральной части антеклизы (Центрально-Белорусскую аномалию).

Карта распределения температуры на глубине 500 м

При построении карты распределения температуры на глубине 500 м (рис. 5) использованы во многом экстраполированные на эту глубину температурные данные. Большинство термограмм, реально измеренных на глубине свыше 500 м, сосредоточено на территории Припятского прогиба и Подляско-Брестской впадины.

Основные температурные аномалии, отмеченные на предыдущей карте, сохраняются. Однако их контуры значительно деформированы, геотемпературное поле в большей степени генерализовано. Конфигурация изотерм претерпевает изменения как вследствие разреженной сети изученных скважин, достигших рассматриваемой глубины, так и неодинакового роста температуры с глубиной. Интервал изменения температуры составляет $9\text{--}20^{\circ}\text{C}$.

Западно-Оршанская аномалия на данной глубине выражена слабо. В северной части она представлена локальными аномалиями по линии Крупки – Полоцк. Южная ветвь аномалии в направлении северной зоны Припятского прогиба не выражена, что может быть обусловлено крайне разреженной сеткой точек наблюдения на данном участке.

Оконтурены три относительно холодные зоны с температурой менее 12°C : Восточно-Оршанская аномалия, аномалия Червенского структурного залива со своим продолжением в пределы Центрально-Белорусского массива и его Бобовнянского погребенного выступа и аномалия Полесской седловины объединяются в единую зону пониженных значений температуры, пересекающую республику в направлении юго-запад – северо-восток. На юге к данной аномалии присоединяется также аномалия

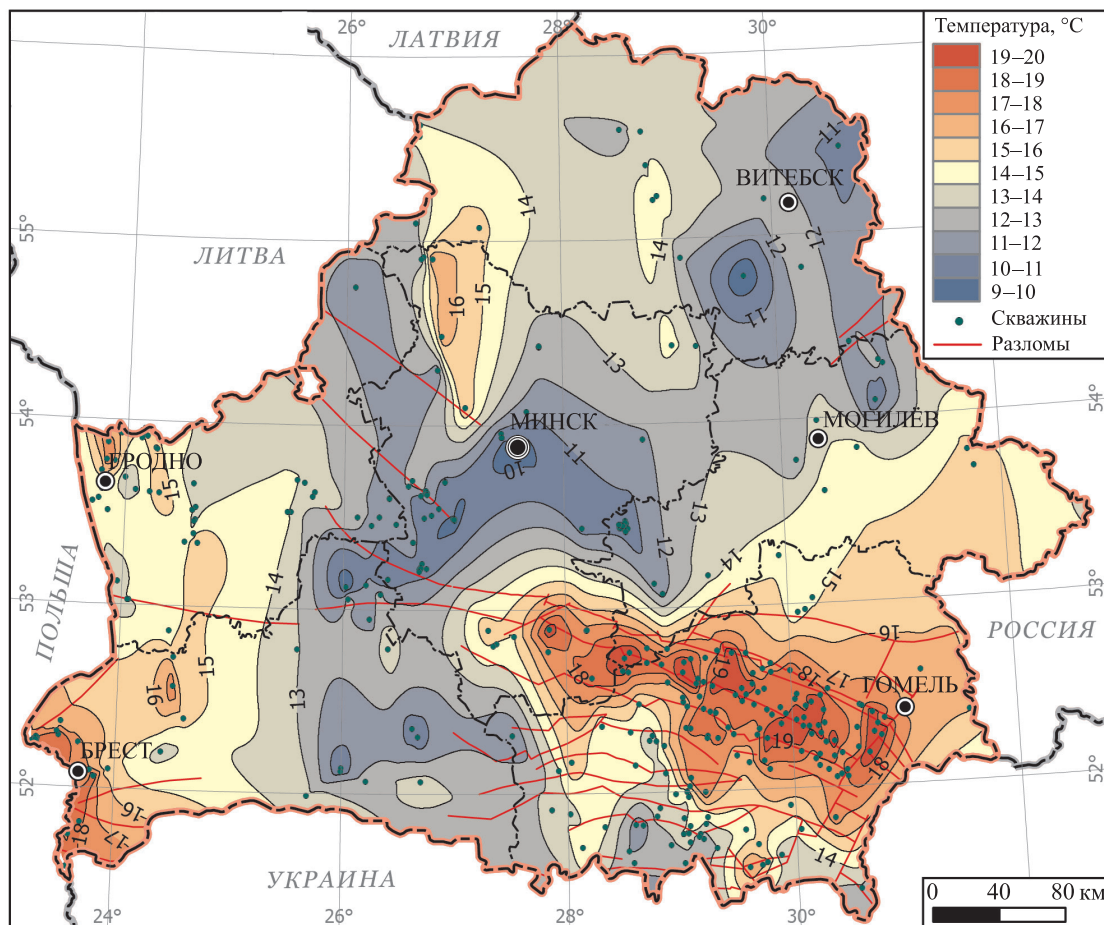


Рис. 5. Карта распределения температуры на глубине 500 м (по [9], с упрощениями)

Fig. 5. Map of the temperature distribution at the depth of 500 m (according to [9], simplified)

южной прибортовой зоны Припятского прогиба, прослеживаемая далее в пределы Украинского щита. Неизменной на изученных глубинах остается Молодечненско-Нарочанская аномалия. Здесь также прослеживается положительная аномалия северной зоны Припятского прогиба.

Карта плотности теплового потока

Карта плотности теплового потока составлена, как отмечалось, на базе каталога его наблюдаемых значений с учетом имеющихся данных по приграничным территориям соседних стран (рис. 6).

Распределение плотности теплового потока в пределах страны имеет контрастный вид. На фоне его низких значений (менее $30\text{--}35\text{ мВт/м}^2$) выделяются две обширные положительные аномалии в восточной части Подляско-Брестской впадины и на западе Белорусской антеклизы ($40\text{--}55\text{ мВт/м}^2$), а также в Припятском прогибе.

В пределах Припятского прогиба поток изменяется от $45\text{--}55\text{ мВт/м}^2$ в западной части до $60\text{--}80\text{ мВт/м}^2$ и более в ядрах соляных куполов [5; 6]. Главная ось аномалии направлена параллельно Северо-Припятскому краевому разлому. Намечается и второе направление аномалии по линии Ельск – Мозырь – Речица, ортогональное основному.

Рядом исследователей выявлен сложный характер распределения теплового потока по разрезу скважин в Припятском прогибе. Его интервальные значения в верхней части геологического разреза изменяются с ростом глубины, свидетельствуя о действии многих факторов: изменении теплопроводности горных пород, слагающих разрез, фильтрации подземных вод и флюидов, тектонических условий в пределах блоков земной коры и др. [5].

Значительное влияние на вариацию геотермических параметров и их изменчивость по разрезу оказывает соляная тектоника. Высокая теплопроводность каменной соли по отношению к терригенным породам вызывает концентрацию теплового потока и его высокие значения в соляных куполах и валах. По мере удаления от куполов тепловой поток снижается, приближаясь к своим фоновым значениям.

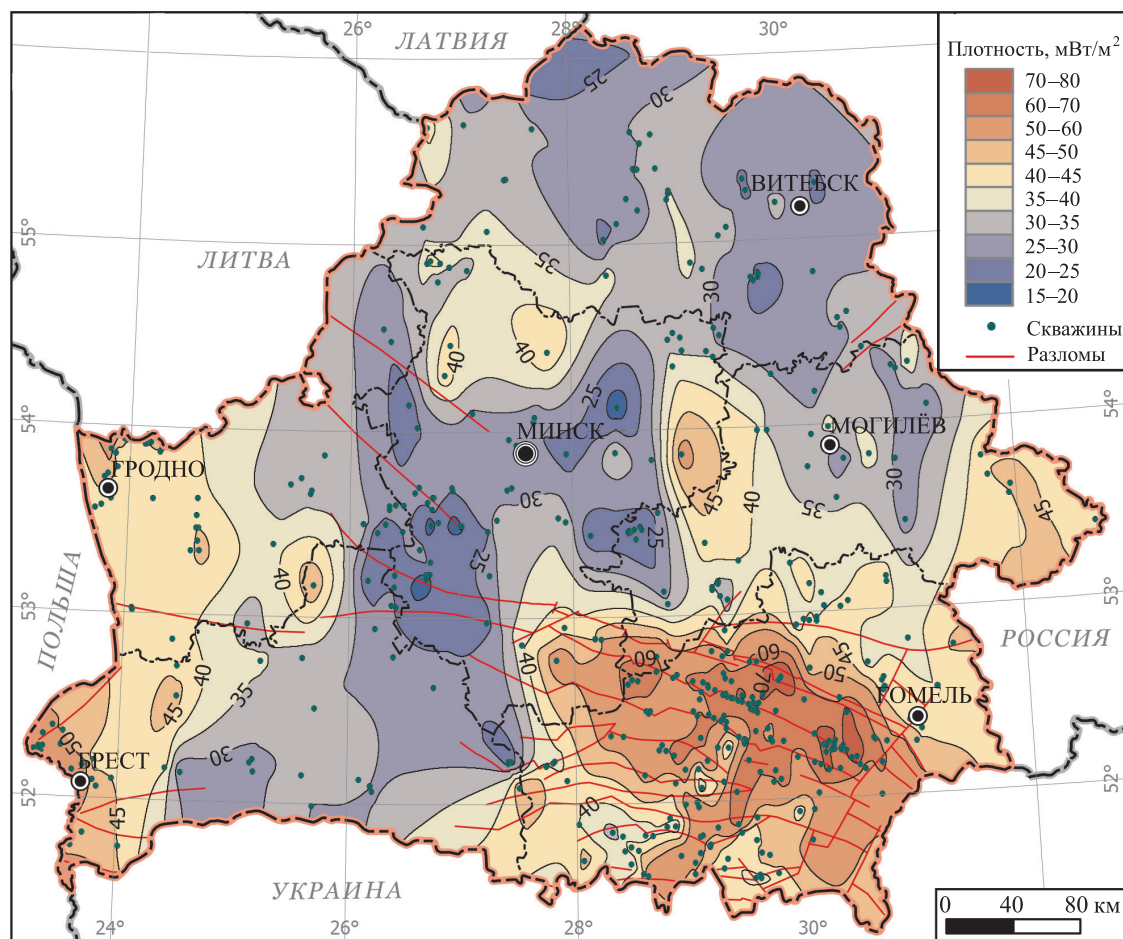


Рис. 6. Карта распределения плотности теплового потока (по [9], с упрощениями)

Fig. 6. Map of the heat flow density distribution (according to [9], simplified)

Установлена значительная изменчивость плотности теплового потока в меридиональном направлении за пределами Северо-Припятского плеча. Повышенные его значения ($40\text{--}50\text{ мВт/м}^2$) представлены также локальными аномалиями над телами гранитоидов Белорусской антеклизы, в Жлобинской седловине, на западном склоне Воронежской антеклизы.

Обширная полоса низких значений теплового потока простирается от Полесской седловины через центральную часть Белорусской антеклизы и достигает белорусско-литовской границы. На востоке к ней примыкает аномалия со значениями потока $20\text{--}30\text{ мВт/м}^2$, охватывающая Червенский структурный залив Оршанской впадины и восточный склон Белорусской антеклизы, а также восточную часть Оршанской впадины, северную часть Белорусской антеклизы и Латвийскую седловину.

Геотермальные ресурсы для интервала глубины 100–200 м

В настоящее время отбор подземного тепла действующими геотермальными установками в Беларуси ведется из горных пород зоны аэрации либо из зоны распространения пресных подземных вод. Геотермальные горизонты минеральных вод и термальных рассолов до сих пор для извлечения геотермальных ресурсов не использовались. В связи с этим имеет смысл рассмотреть плотность геотермальных ресурсов, содержащихся в зоне активного водообмена.

Интервал глубины 100–200 м почти целиком относится к этой зоне, за исключением локальных участков территории в Оршанской впадине и в среднем течении р. Припяти, где на глубине примерно 150 м встречены слабоминерализованные воды. В интервале глубины 100–200 м в платформенном чехле широко развиты гидрогеологические окна, где имеет место перетекание подземных вод и гидродинамическая взаимосвязь водоносных горизонтов, поэтому в первом приближении этот интервал можно рассматривать как единый геотермальный горизонт. Распределение плотности геотермальных ресурсов по изученным скважинам приведено на рис. 7.

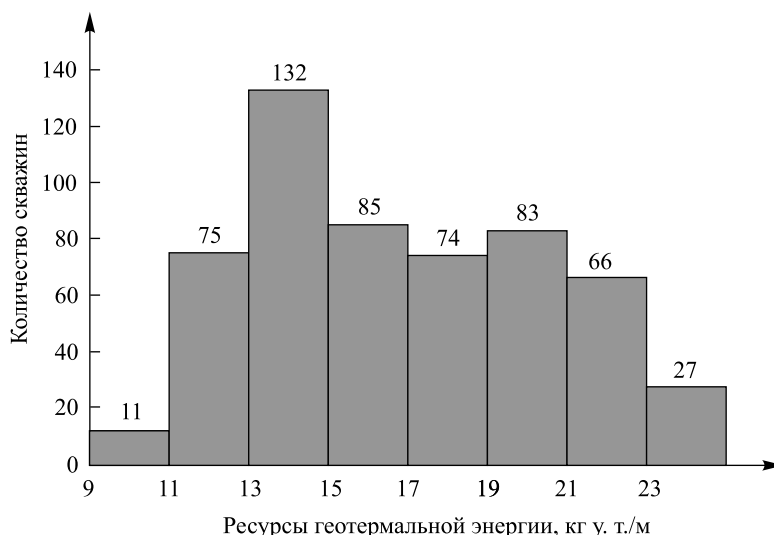


Рис. 7. Количество скважин и плотность ресурсов геотермальной энергии
Fig. 7. Number of boreholes and the density of geothermal energy resources

Повышенные значения плотности извлекаемых геотермальных ресурсов выявлены в Брестской области, в полосе вдоль белорусско-украинской границы, а также в северной зоне Припятского прогиба и на западном склоне Воронежской антеклизы в эквиваленте 17–25 килограммов условного топлива на квадратный метр земной поверхности (кг у. т./м²) (см. рис. 7). За их пределами плотность ресурсов снижается до 13–15 кг у. т./м². Минимальные значения отмечены на отдельных участках Витебской, Могилёвской и Минской областей (рис. 8).

В Витебской и Могилёвской областях величины возобновляемых ресурсов подземного тепла, пригодных для практического использования, находятся в пределах 10–17 кг у. т./м². В Могилёвской области по мере приближения к Припятскому прогибу плотность ресурсов увеличивается до 18–20 кг у. т./м², и ожидаемая эффективность геотермальных установок на базе тепловых насосов здесь возрастает.

Максимальная величина плотности геотермальных ресурсов выявлена в Припятском прогибе, на крайнем юго-западе Беларуси, в полосе, примыкающей к государственной границе с Украиной и отчасти – с Польшей. Локальные области повышенных значений плотности ресурсов геотермальной энергии выявлены к востоку от Гродно, а также по линии Ивацевичи – Новогрудок и Молодечно – Вилейка. Названные территории являются наиболее перспективными для первоочередного создания геотермальных установок по извлечению подземного тепла в Беларуси.

Геотермальные ресурсы в надсолевых верхнедевонско-каменноугольных отложениях Припятского прогиба

Отложения надсолевого девона и перекрывающие их толщи каменноугольных отложений залегают на верхней соли. С увеличением глубины здесь возрастает и минерализация подземных рассолов, однако она значительно ниже, чем в межсолевых и подсолевых отложениях, где откачка термальных рассолов связана с рядом технических проблем, что делает надсолевые отложения наиболее перспективными в плане извлечения ресурсов геотермальной энергии.

Величины плотности извлекаемых ресурсов геотермальной энергии в толще рассматриваемых отложений (рис. 9) изменяются от менее чем 50 кг у. т./м² на западе до 700–800 кг у. т./м² в пределах его восточной и северо-восточной частей. Распределение геотермальных ресурсов в толще надсолевых отложений весьма неравномерное, прежде всего на востоке прогиба. Здесь характерны резкие перепады получаемых значений на небольших расстояниях.

Такой контраст обусловлен несколькими факторами. Существенное влияние на картину распределения ресурсов подземного тепла оказывает степень прогретости надсолевой толщи тепловым потоком, поступающим из залегающей ниже верхнесолевого толщи при общем погружении платформенного чехла в северо-восточном направлении. Вторым фактором появления локальных аномалий является соляная тектоника, в частности соляные валы и купола, развитые в прогибе. Наиболее высокие значения извлекаемых ресурсов подземного тепла выявлены в северной и восточной частях палеорифта. Западная часть прогиба в геотермическом отношении изучена еще достаточно слабо. Картина распределения геотермальных ресурсов здесь подлежит уточнению по мере накопления новых данных.

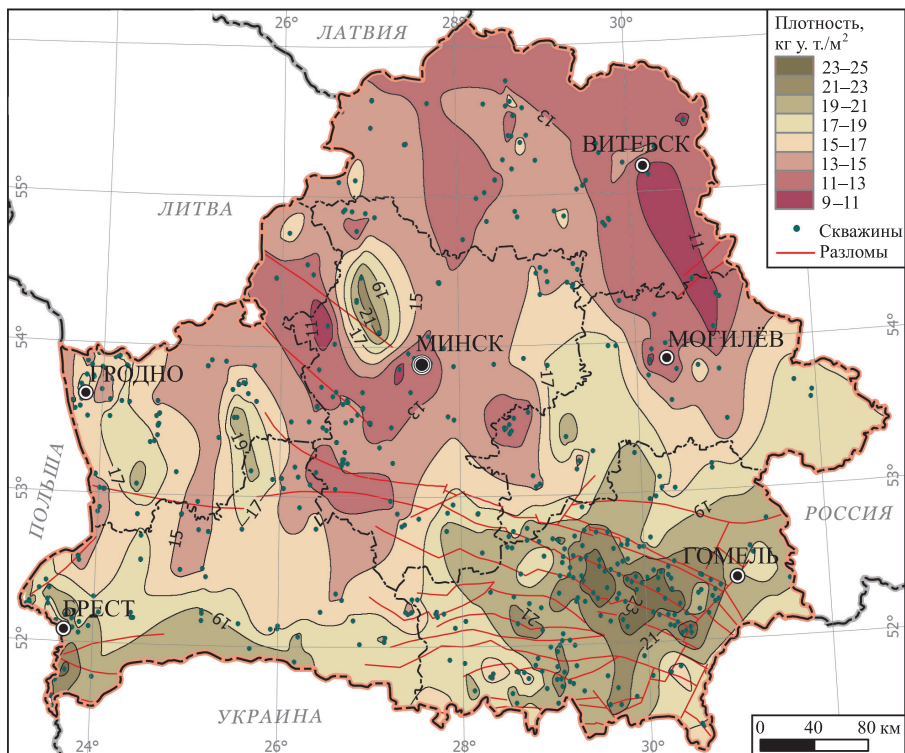


Рис. 8. Распределение плотности геотермальных ресурсов для интервала глубины 100–200 м (по [9], с упрощениями)

Fig. 8. Distribution of the geothermal resources density, depth interval of 100–200 m (according to [9], simplified)

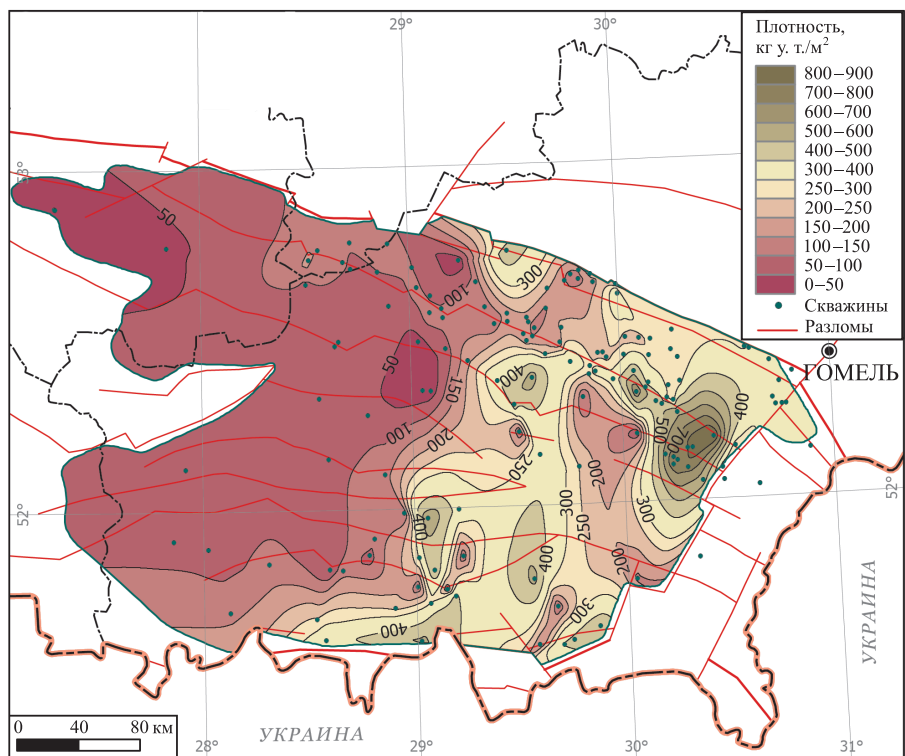


Рис. 9. Распределение плотности геотермальных ресурсов в толще отложений надсолевого девона Припятского прогиба (по [9], с упрощениями)

Fig. 9. Distribution of the density of geothermal resources within the thickness of Devonian sediments overlying the Upper Salt within the Pripyat Trough (according to [9], simplified)

Заклучение

В течение более чем 50-летних геотермических исследований в Беларуси накоплен значительный материал по тепловому режиму платформенного чехла Беларуси – термограммы скважин, данные по тепловым свойствам горных пород, плотности теплового потока, извлекаемым ресурсам подземного тепла. Они послужили основой создания первого в стране Геотермического атласа в виде серии геотермических карт.

Данный атлас представляет собой первое наиболее полное картографическое обобщение накопленных данных. Он включает 10 сводных карт для всей территории страны и 16 карт отдельно для наиболее изученного осадочного бассейна республики – Припятского прогиба. В атлас входит каталог плотности теплового потока Беларуси, составленный в формате, рекомендованном Международной комиссией по тепловому потоку. Он содержит данные по 497 изученным скважинам.

Работы по созданию атласа проводились в период с 2011 по 2015 г. Подготовка его к печати и редактирование велись на протяжении 2016–2017 гг.

Библиографические ссылки

1. Hurter S, Haenel R, editors. *Atlas of Geothermal Resources in Europe*. Hannover: European Communities, Leibnitz Institute for Applied Geosciences (GGA); 2002. 92 p. + 89 plates.
2. Атрощенко ПП. *Геотермические условия северной части Припятской впадины*. Богомолов ГВ, редактор. Минск: Наука и техника; 1975. 104 с.
3. Богомолов ГВ, Цыбуля ЛА, Атрощенко ПП. *Геотермическая зональность территории БССР*. Минск: Наука и техника; 1972. 216 с.
4. Богомолов ГВ, редактор. *Гидродинамика и геотермия нефтяных структур*. Минск: Наука и техника; 1975. 240 с.
5. Зуй ВИ. *Тепловое поле платформенного чехла Беларуси*. Минск: Экономпресс; 2013. 260 с.
6. Левашкевич ВГ. *Геотермия запада Восточно-Европейской платформы*. Минск: Беларуская навука; 2013. 153 с.
7. Зуй ВИ. *Основы геотермии*. Минск: БГУ; 2017. 288 с.
8. Hurlig E, Haenel R, Čermak V, Zui V, editors. *Geothermal Atlas of Europe. Members of the Working Group «Geothermal Atlas of Europe» of the International Heat Flow Commission*. Gotha: Geographisch-Kartographische Anstalt; 1991. Explanatory Note 156 p. + 36 maps.
9. Зуй ВИ, редактор. *Геотермический атлас Беларуси*. Минск: Национальная библиотека Беларуси; 2018. 91 с.
10. Махнач АС, редактор. *Геология Беларуси*. Минск: Институт геологических наук, НАН Беларуси; 2001. 815 с.

References

1. Hurter S, Haenel R, editors. *Atlas of Geothermal Resources in Europe*. Hannover: European Communities, Leibnitz Institute for Applied Geosciences (GGA); 2002. 92 p. + 89 plates.
2. Atroshchenko PP. *Geotermicheskie usloviya severnoi chasti Pripyatskoi vpadiny* [Geothermal conditions of the northern part of the Pripyat Depression]. Bogomolov GV, editor. Minsk: Nauka i tekhnika; 1975. 104 p. Russian.
3. Bogomolov GV, Tsybulya LA, Atroshchenko PP. *Geotermicheskaya zonal'nost' territorii BSSR* [Geothermal zonality of the BSSR]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1972. 216 p. Russian.
4. Bogomolov GV, editor. *Gidrodinamika i geotermiya neftyanykh struktur* [Hydrodynamics and Geothermics of oil-bearing structures]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1975. 240 p. Russian.
5. Zui VI. *Teplovoe pole platformennogo chekhla Belarusi* [Thermal field of the platform cover within Belarus]. Minsk: Econompress; 2013. 260 p. Russian.
6. Levashkevich VG. *Geotermiya zapada Vostochno-Evropeiskoi platformy* [Geothermics of the western part of the East European Platform]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2013. 153 p. Russian.
7. Zui VI. *Osnovy geotermii* [Fundamentals of Geothermics]. Minsk: Belarusian State University; 2017. 288 p. Russian.
8. Hurlig E, Haenel R, Čermak V, Zui V, editors. *Geothermal Atlas of Europe. Members of the Working Group «Geothermal Atlas of Europe» of the International Heat Flow Commission*. Gotha: Geographisch-Kartographische Anstalt; 1991. Explanatory Note 156 p. + 36 maps.
9. Zui VI, editor. *Geotermicheskii atlas Belarusi* [Geothermal Atlas of Belarus]. Minsk: National Library of Belarus; 2018. 91 p. Russian.
10. Makhnach AS, editor. *Geologiya Belarusi* [Geology of Belarus]. Minsk: Institut geologicheskikh nauk, NAN Belarusi; 2001. 815 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 31.05.2018.
Received by editorial board 31.05.2018.