

Тепловой режим Земли

Б. Г. Поляк, Я. Б. Смирнов

Кандидаты геолого-минералогических наук



Борис Григорьевич Поляк, научный сотрудник Лаборатории геотермии Геологического института АН СССР. Занимается изучением теплового поля Земли, вулканизма, термальных вод, энергетики геологических процессов. Автор многих научных работ.



Яков Борисович Смирнов, научный сотрудник Лаборатории геотермии Геологического института АН СССР. Изучает природу геодинамических процессов в земной коре и верхней мантии. Автор многих научных работ.

Тепловое поле Земли — первое геофизическое поле, ставшее предметом научного исследования. Оно привлекало внимание античных натуралистов (жертвой своего энтузиазма стал Плиний-Старший, погибший во время наблюдений за извержением Везувия в 79 г. до н. э.), средневековых естествоиспытателей (Агрикола, А. Купфер), основоположников современной науки Р. Бойля, М. В. Ломоносова, Ж. Фурье. Гипотеза Канта — Лапласа и расчеты Кельвина в свое время подчеркнули космогоническое и геологическое значение исследования внутриземного тепла. Открытие радиоактивности дало им новую перспективу, сразу же оцененную В. И. Вернадским, Дж. У. Рэлеем, Дж. Джоли и изученную затем А. Холмсом, Г. Макдональдом, А. Н. Тихоновым, В. Г. Хлопиным, Г. Юри и многими другими. Одновременно нарастал интерес к геотермическому полю в связи с практической деятельностью человека. Горнодобывающая промышленность требовала точного прогноза температурного режима осваиваемых недр, а неудержимо растущее производственное потребление энергии поставило вопрос об использовании огромных ресурсов глубинного тепла.

Направление исследований

В проблематике геотермических исследований, представляющих собой, по выражению В. И. Вернадского, «важнейший, по существу геофизический комплекс проблем», сейчас выделяются три основных направления: теоретические, региональные и прикладные исследования.

Одна из важнейших проблем теоретической геотермии состоит в выяснении природы глубинного тепла и его роли в общем энергетическом балансе Земли. В этой связи исследуется значение радиоактивного распада, который большинством исследователей признается главным источником внутриземного тепла, а также процессов образования планеты, гравитационной дифференциации ее вещества, физико-химических преобразований, приливного трения в системе Земля — Луна, горообразования, сейсмических явлений, вулканизма, возможного изменения мировой гравитационной постоянной, поглощения Землей космических частиц и т. п.

Другая важная проблема — изучение механизмов передачи тепла в Земле. Анализ различных видов теплопереноса советским геофизиком Е. А. Любимовой привел ее к предположению о существовании в Земле на глубине около 100 км «теплозапирающего слоя». Отсюда следуют важные выводы о возможном разогревании недр, существовании полурасплавленной «астеносферы» на границе коры и мантии Земли и др.

Конечная задача теоретических работ в области геотермии — выяснение тепловой истории Земли и распределения температур в различных геосферах. Она требует синтеза результатов, полученных при решении двух названных выше проблем. и ряда других геолого-геофизических данных (например, об изменении по радиусу Земли скоростей распространения сейсмических волн и электромагнитных свойств ее вещества, о возможной глубине полно-

го или частичного его плавления и т. д.).

Такой синтез позволяет, в частности, предполагать, что в подошве земной коры (глубина 5—50 км) температура колеблется от 200 до 1200°, на границе мантии и ядра (2 900 км) она приближается к 6 000°, а в центре ядра достигает 6 000—8 000°.

Развитие региональной геотермии началось с картирования современного геотемпературного поля в пределах вскрытой бурением части земной коры. Исходным материалом для таких построений служат результаты измерений температуры пород в скважинах, шахтах, туннелях и других горных выработках.

Современная техника сделала возможным массовое бурение скважин на глубину 4—6 км. Некоторые скважины уже достигли глубин 7—8 км, и сейчас начинается сверхглубокое бурение, которое должно дать ценнейший материал о строении 10—15 верхних километров разреза земной коры. С глубиной происходит рост температуры, свидетельствующий о существовании постоянного потока тепла из недр Земли к ее поверхности: на забое наиболее глубоких скважин температура достигает 150—200° и более. Так, в одном из нефтяных районов США на глубине 7 730 м отмечена температура 180°, а у нас, в Ставрополье, на глубине 6 318 м — 220°. Еще выше температура недр в тех областях, где в последнее время происходила вулканическая деятельность. Здесь много так называемых геотермальных районов, характеризующихся выходами на поверхность Земли горячих подземных вод и пара. Известно, например, что в разбуриваемом еще с XIX в. геотермальном районе Лардерелло (Италия) горные породы на глубине всего 350—500 м нагреты до 220—240°; в новозеландском районе Вайотапу отмечена самая высокая подземная температура — 295° (1000 м), а в Калифорнии (район Ниланд), где на глубине 900 м зафиксирована температура 260°, предполагается ее повышение до 340° на уровне 1400 м. Наибольший размах работы по региональной геотермии приняли именно в нашей стране, для всей территории которой построены различные

геотермические карты. Сопоставление их с данными геологического строения, гидрогеологических условий и параметрами других геофизических полей позволяет выявить основные влияющие на распределение глубинных температур факторы (особенности геологической структуры, состав горных пород, движение подземных вод) и оценить их роль в каждом отдельном случае. С другой стороны, мы получаем характеристики реальных температурных условий, в которых находятся геологические тела и развиваются многообразные физико-химические процессы.

Другая разновидность региональных геотермических исследований — измерение теплового потока из недр Земли и выяснение особенностей его пространственного распределения. Характеризуя современный энергетический режим планеты в целом и отдельных различно построенных участков земной коры, этот параметр несет важную информацию о природе глубинного тепла, термической эволюции Земли, направлении и интенсивности геологических процессов и поэтому привлекает к себе особое внимание исследователей.

Закономерности распределения теплового потока

Исторически сложилось так, что другие разделы геотермии намного опередили изучение теплового потока — основного и наиболее стабильного геотермического параметра. Лишь в самое последнее время стало выясняться огромное значение исследований теплового поля и теплового потока для понимания геолого-тектонического развития Земли и происходящих в ней физических и химических процессов. Честь проведения первых (1939 г.) определений теплового потока на суше принадлежит известному английскому ученому Э. Булларду. Позднее, в 1952 г., по его же инициативе были начаты исследования теплового потока через дно океана.

В настоящее время число измерений теплового потока по земному шару составляет около 3 000, причем боль-

шая часть из них получена за последние 5—7 лет.

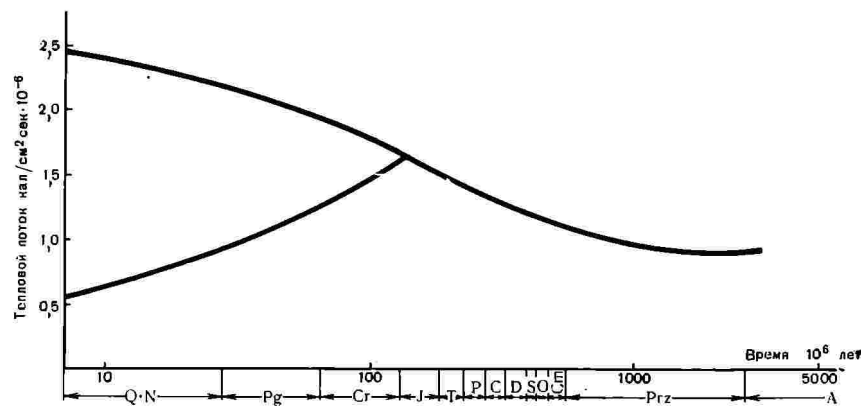
Географическое распределение пунктов измерений крайне неравномерно — на суше (около 700 измерений) они концентрируются в западной и восточной частях Североамериканского континента, в Центральной и Юго-Восточной Европе, западных и южных частях Советской Азии и на Японских островах. Небольшое количество измерений проведено в Австралии и Южной Африке. Более равномерно распределены измерения на океанических площадях, однако севернее 40° с. ш. и южнее 40° ю. ш. они практически отсутствуют.

При анализе полученных данных было подмечено, что различия между величинами теплового потока носят характер закономерности. «Кажется вероятным», — писал Ф. Берч в 1954 г., — что имеются естественные вариации теплового потока, связанные со структурными и химическими вариациями регионального масштаба¹. Еще раньше, в 1948 г., сходное предположение высказал чл.-корр. АН СССР П. Н. Кропоткин, изучив распределение геотермического градиента.

По мере накопления данных закономерности распределения теплового потока стали проявляться. Было установлено, что минимальными значениями теплового потока характеризуются наиболее древние и стабильные структуры Земли — докембрийские щиты. Максимальные же величины теплового потока характерны для интенсивно развивающихся в настоящее время структур кайнозойских и современных геосинклиналей (Альпийский и Тихоокеанский пояса), и срединно-океанических хребтов.

Основываясь на этих заключениях и общих тенденциях энергетического развития Земли, мы предположили, что величины теплового потока должны быть специфичными для всех различно построенных участков земной коры. Расположение по земному шару, морфология и генезис таких участков составляют предмет исследований фундаментальной гео-

¹ F. Birch. The present state of the geothermal investigations, «Geophysics», v. 19, 1954, N 4, p. 647.



Зависимость теплового потока от возраста активного этапа развития земной коры. По вертикали отложен тепловой поток, по горизонтали — время в миллионах лет, а также стратиграфическая шкала.

логической науки — геотектоники. Используя основополагающие работы советских и зарубежных тектонистов, а также геотектонические карты, нам удалось выделить однородные множества величин теплового потока для основных тектонических структур Земли.

В дальнейшем эти множества были обработаны методами теории вероятностей и математической статистики. Оказалось, что всем различным тектоническим блокам земной коры соответствуют и различные величины глубинного теплового потока, причем в стабильных, наиболее древних структурах Земли тепловой поток минимален, в современных активных структурах — максимален, а в промежутке между ними — закономерно увеличивается.

Так, величина глубинного теплового потока в областях докембрийской складчатости (древнее 600 млн лет) составляет (в единицах, 10^{-6} кал/см²·сек) 0,9—1,0; в областях байкальской и каледонской складчатости (400—600 млн лет) — 1,10; герцинской (250—400 млн лет) — 1,25; мезозойской (100—250 млн лет) — 1,50; кайнозойской (0—100 млн лет) — 2,20. Это позволило сделать вывод, что величины теплового потока отражают возраст консолидации и активизации земной коры, т. е. возраст геосинклинального процесса.

В тектонически активных поясах величины глубинного теплового потока резко дифференцированы по конкретным структурным элементам.

Они низки $\sim (0,8—1,0) \cdot 10^{-6}$ кал/см²·сек — в интенсивно прогибающихся зонах (океанических желобах, краевых прогибах, межгорных впадинах и т. п.) и высоки $\sim (1,8—2,4) \cdot 10^{-6}$ кал/см²·сек — в воздымающихся структурах и областях молодого вулканизма.

Указанная закономерность носит общий характер для всех тектонически активных поясов Земли на континентах, в океанах, а также в зонах перехода между ними и свидетельствует о больших масштабах перераспределения глубинной энергии в этих активных поясах.

На океанических площадях нормальные величины теплового потока — порядка $(1,0—1,4) \cdot 10^{-6}$ кал/см²·сек свойственны стабильным глубоким впадинам (плитам), повышенные и высокие — различным положительным структурам дна океанов и срединно-океаническим хребтам.

Особенно интересно и сложно распределение теплового потока в пределах сравнительно недавно открытых тектонических зон дна океанов — срединно-океанических хребтов. Эти грандиозные структуры шириной до нескольких тысяч километров и длиной более 60 тыс. км создают концентрическую систему, опоясывающую весь земной шар. В центральных частях хребтов обычно выделяется рифтовая зона — чередование узких линейно вытянутых хребтов и долин с перепадом высот между ними в несколько километров. В этих центральных частях хреб-

та шириной до 200—300 км устанавливаются наиболее высокие потоки тепла — в общем более $3 \cdot 10^{-6}$ кал/см²·сек и нередко до 7—8 и даже $10 \cdot 10^{-6}$ кал/см²·сек. По направлению от центра хребта к его флангам тепловой поток резко снижается — до $(0,3—0,5) \cdot 10^{-6}$ кал/см²·сек. Таким образом, и здесь, вероятно, происходит мощное перераспределение энергии между отдельными элементами хребта. Очень высокие величины теплового потока в центральных частях хребтов свидетельствуют, по видимому, о неглубоком залегании очагов расплавленной магмы.

Выявленные закономерности в распределении глубинного теплового потока дали возможность построить схематическую карту теплового поля Земли и установить равенство потока тепла через площади с земной корой континентального и океанического типов. Кроме того, удалось уточнить одну из важнейших геофизических констант для Земли — величину средних потерь тепла. Она оказалась равной $1,18 \cdot 10^{-6}$ кал/см²·сек. Отсюда нетрудно получить и общее количество тепла, которое Земля излучает в космическое пространство в настоящее время: умножая средний тепловой поток на площадь поверхности Земли, получаем величину $(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{12}$ кал/сек или $(2,5 \pm 0,25) \cdot 10^{20}$ эрг/сек. В результате этого процесса Земля теряет за год столько энергии, что освоение лишь 2% ее удовлетворило бы все потребности мировой экономики.

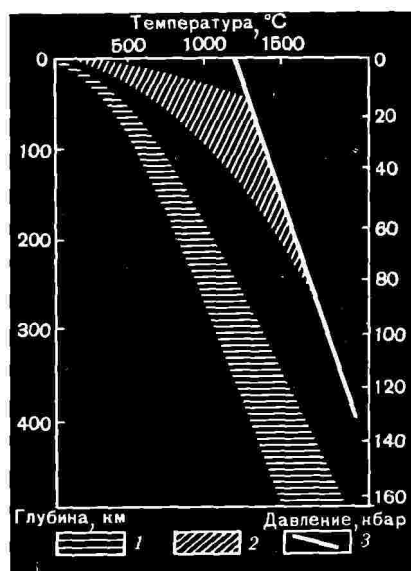
Тепловой поток и проблемы эволюции Земли

Изучение теплового потока дает важную количественную информацию о современном состоянии Земли и тем самым открывает новые перспективы разрешения коренных проблем геологии.

Кондуктивные теплопотери Земли — важнейший элемент геознергетического баланса, общая структура которого выясняется при анализе возможных источников глубинной энергии, путей ее трансформации и способов расхода. Подчеркивая важность такого анализа, В. И. Вернадский еще в 1933 г. писал: «Энергетика земной коры — есть та проблема, которая стоит сейчас перед геологом»¹. С тех пор разработка этого направления значительно продвинулась вперед благодаря трудам П. Н. Кропоткина, Е. А. Любимовой, Е. Н. Люстиха, В. А. Магницкого и многих других советских и зарубежных исследователей.

На нынешней стадии развития Земли кондуктивный теплопоток составляет более 98% общих потерь ее внутренней энергии. Остальная, совсем незначительная часть приходится на долю конвективного выноса тепла — в ходе вулканического процесса и разгрузки гидротерм.

Генерация тепла в Земле может быть следствием внутриатомных процессов, диссипации в различных гидросферах кинетической энергии ее вращения и преобразований потенциальной гравитационной энергии. По наиболее распространенным представлениям, главную роль в приходной части геознергетического баланса, как уже говорилось, играет распад радиоактивных элементов, рассеянных в земном веществе. Оценки его современного эффекта колеблются в диапазоне (1,4—3,0) · 10²⁸ эрг/год, из чего следует, что уже один этот процесс может с избытком обеспечить весь наблюдаемый расход внутриземной энергии. Если учесть возможный вклад других



Распределение глубинных температур в земной коре и верхней мантии: 1 — минимальные температуры (для стабильных структур); 2 — максимальные температуры (для активных структур); 3 — линия фракционного плавления вещества мантии.

подобных явлений, то расхождение между приходной и расходной частями геознергетического баланса оказывается большим. Хотя не исключено, что это расхождение вызвано неправильной оценкой содержания радиоактивных элементов в глубоких частях Земли, сейчас его можно интерпретировать как признак постоянного накопления энергии в Земле или как признак осуществления очень мощного «энергемкого» процесса (типа общего расширения Земли, предполагаемого П. Иорданом, Л. Эдьеом и некоторыми другими исследователями).

Таким образом, очевиден космогонический аспект изучения теплового потока: выявляемая им величина общих потерь внутриземного тепла служит одним из граничных условий в любой концепции о происхождении и развитии нашей планеты. В сочетании с уже установленными геохимическими и сейсмологическими закономерностями (определенное содержание радиоактивных элементов в горных породах, специфика свойств

различных геосфер и т. п.) величина теплового потока определяет круг удовлетворяющих природным фактам теоретических моделей Земли и возможных механизмов ее эволюции.

Сущность последней — процессы тепломассопереноса. Именно они являются физической основой современных универсальных геотектонических гипотез — будь то представления о тепловой или гравитационной конвекции в сейсмически твердой мантии Земли, наиболее распространенные среди зарубежных ученых, или концепция «зонной плавки», поддерживаемая советскими геологами.

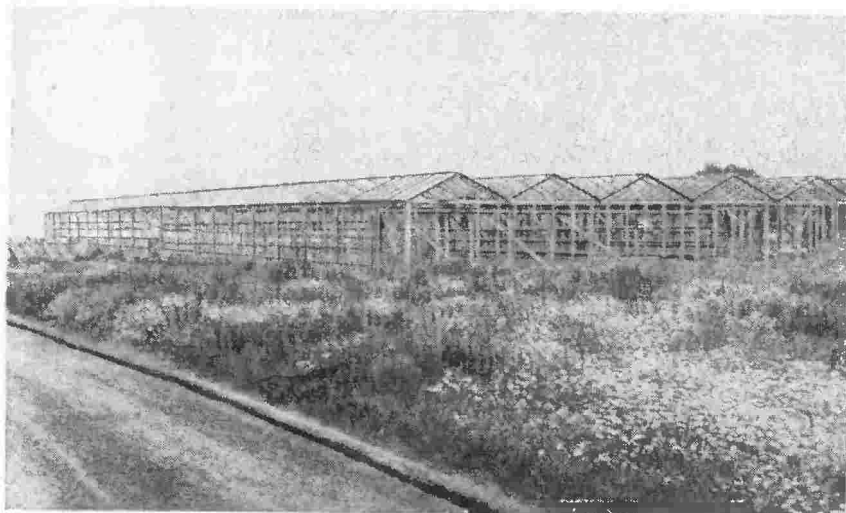
Закономерности распределения теплового потока проливают свет на многие более частные аспекты геологической эволюции — на природу тектонической активности, размещение вулканических центров, глубину возникновения магматических расплавов, условия метаморфических преобразований.

Давно сложившееся представление о связи геологических процессов с тепловым режимом недр очень четко сформулировал известный американский петролог Дж. Ферхуген: «Геолог, задавшийся целью удовлетворительно объяснить механизм таких явлений, как дислокации, горообразование или магматизм, неизбежно приходит к выводу, что главный источник энергии в таких процессах — теплота. То, что происходит на поверхности, зависит от характера источников тепла и их положения»¹.

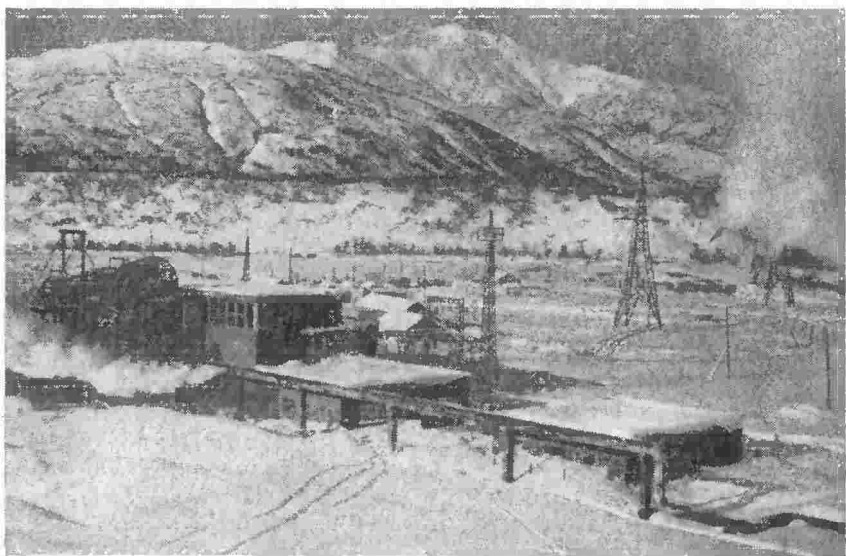
Геотермический анализ этих явлений основывается на неоднородности геотемпературного поля, вытекающей из геотектонической дифференциации теплового потока. Как показывают расчеты, в тектонически стабильных структурах на нижней границе земной коры (раздел Мохоравичича) температура составляет, в зависимости от мощности коры и возраста тектогенеза, от 400 до 800°.

¹ В. И. Вернадский. Избр. соч., т. IV, кн. 2, Изд-во АН СССР, 1960, стр. 157.

¹ Дж. Ферхуген. Температура в недрах Земли; в сб., «Физика и химия Земли», ИЛ, 1958, стр. 30.



Теплицы в районе Матачкалы, обогреваемые термальными водами.



Паужетская геотермальная станция им. В. В. Аверьева. Названа в память крупного советского ученого Валерия Викторовича Аверьева, пионера в области изучения и использования тепла Земли на Камчатке. Его исследования легли в основу строительства этой станции.

В подвижных поясах Земли (Альпийско-Гималайский пояс, Тихоокеанское кольцо, планетарная система срединно-океанических хребтов, тектонически активизированные участки древних платформ) температура у подошвы земной коры варьирует гораздо резче. В зонах высоких тепловых потоков (эвгеосинклинали, миогеосинклинали орогенной стадии развития, рифтовые гряды океанических хребтов) она достигает 900—1 200° и более, а в зонах низких потоков (краевые прогибы, океанические желоба, рифтовые долины) —

всего 200—600°. Такая неоднородность геотемпературного поля, приводящая к существованию на стыке этих зон в интервале глубин 20—100 км горизонтальных градиентов температуры от 3 до 10° на километр, несомненно, является одной из причин тектонической мобильности подвижных поясов и, в частности, их сейсмичности.

Аналогичная неоднородность обнаруживается и в распределении на земном шаре вулканической деятельности. Все районы современного вулканизма приурочены к областям

с наибольшими значениями теплового потока. Его средняя величина в этих областях равна $2,2 \cdot 10^{-6}$ кал/см² · сек. (причем ареал этих значений обычно в большей или меньшей степени превосходит площадь поверхностных проявлений вулканизма), а на отдельных локальных участках — в кратерах и на склонах действующих вулканов или местах выхода на поверхность горячих глубинных вод — тепловой поток достигает значений, на два — три порядка превышающих фоновые. В районах, где вулканическая деятельность прекратилась,

средний тепловой поток долго еще остается повышенным, отражая время завершения тектоно-магматической активности (районы кайнозойского вулканизма Центральной и Западной Европы, мезозойского вулканизма Южной Африки и т. п.). Поэтому вспышки вулканической активности на древних платформах Восточной Сибири, Индии, Южной Америки, приведшие к образованию трапповых формаций — мощных толщ вулканогенных продуктов, служат признаком резкого увеличения теплового потока в определенные моменты геологической истории на участках этих, уже давно стабилизировавшихся, структур, т. е. доказательством их вторичной тектонической активизации.

Сопоставление неоднородностей геотемпературного поля с составом вулканических продуктов указывает на возможное происхождение последних и объясняет их изменение в ходе геологического развития тех или иных структур. Для плавления базальтов и других сходных пород с относительно малым содержанием кремнезема (этот процесс происходит лишь при $1\,200\text{--}1\,300^\circ$) наиболее благоприятны геотермические условия тектонически активных областей Земли, точнее, эвгеосинклинальных зон подвижных поясов и осевых частей срединно-океанических хребтов, а также миегосинклинальных зон в орогенную стадию их развития. Расплавы основного и ультраосновного состава должны возникать здесь на глубинах от $40\text{--}50$ км (в осевых частях океанических рифтов — начиная с $8\text{--}12$ км), причем возможности их появления сохраняются до глубин $400\text{--}500$ км. Этот интервал соответствует верхней мантии и, может быть, лишь самым нижним горизонтам земной коры. Таким образом, геотермический анализ устанавливает подкоровое происхождение основных и ультраосновных магм. Расплавы кислого состава (т. е. богатые кремнеземом), дающие начало гранитам и химически близким к ним изверженным породам, могут образовываться при менее высоких температурах — в присутствии воды до 700° . Такие условия создаются уже в коре. В этом свете массовые прояв-

ления гранитоидного магматизма в орогенную стадию развития миегосинклиналей хорошо объясняются увеличением глубинного теплового потока и соответствующим ростом температур.

Геотермическим режимом недр определяется характер постепенных изменений минералогического и химического состава горных пород, их внутренней структуры и физико-механических свойств, т. е. степень их метаморфизма. Например, на Японской островной дуге — на одном из звеньев Тихоокеанского подвижного пояса — наиболее высокотемпературная (андалузит-силлиманитовая) метаморфическая фация приурочена к районам с высоким тепловым потоком, а в зоне относительно небольших его значений развиты низкотемпературные (жадеит-глаукофановые) метаморфические сланцы. Установленные геотермические закономерности распределения различных метаморфических фаций в пределах современных подвижных поясов объясняют чередование их по площади и в разрезе более древних аналогов таких структур (Урала, Алтая и т. п.). Наблюдаемое распределение параметров геотермического поля тесно увязывается и со многими другими геологическими и геофизическими закономерностями — такими как направление и интенсивность новейших вертикальных тектонических движений, характер гравитационного поля, положение магнитных масс и многие другие. Эти связи говорят о генетической общности различных явлений, наиболее вероятной причиной которых кажется неоднородность температур в глубоких недрах Земли, обуславливающая различие плотности, вязкости и других свойств ее вещества в пространстве и времени.

Прикладное значение геотермических исследований

В сферу промышленного использования по мере углубления горных выработок вовлекаются все более и более глубокие горизонты земной коры. Уже сейчас отдельные шахты

в угольных бассейнах и рудных районах мира проникли на глубины, где естественная температура пород достигает $50\text{--}60^\circ$, а иногда и выше. Проведение горных работ при повышенных температурах требует создания систем вентиляции, обеспечивающей нормальные условия труда шахтеров. Общим основанием для проектирования этих систем служат результаты региональных геотермических исследований, а для уточнения даваемых ими прогнозных оценок делаются специальные термометрические наблюдения.

Не меньшее значение имеют геотермические исследования для правильной организации шахтного и другого строительства в условиях «вечной мерзлоты». Резкое различие физико-механических и фильтрационных свойств мерзлых и талых пород определяет важность установления границ мерзлой зоны и возможности их смещения как под влиянием природных факторов, так и в результате инженерно-технической деятельности человека. Расчеты геотемпературного поля, основанные на термометрических наблюдениях в скважинах, позволяют выяснить конфигурацию этих границ и поведение их во времени. Благодаря неодинаковой теплопроводности различных типов горных пород и некоторым температурным эффектам, возникающим при бурении скважин, геотермические исследования помогают уточнить строение геологического разреза, а в некоторых случаях и обнаружить полезные ископаемые (например, водоносные пласты, газовые залежи, «слепые» рудные тела). Большое значение имеют термометрические методы в промысловых исследованиях — для изучения технического состояния скважин, выяснения темпа и направления движения «законтурных» вод при эксплуатации нефтяных и газовых месторождений (особенно при распространной сейчас закачке вод в пласты для интенсификации добычи), для характеристики теплового режима нефтепродуктивных пластов в процессе термического воздействия на них, обеспечивающего большую подвижность нефтей и соответственно более полное их извлечение, и т. п.

Но горнопромышленный аспект не исчерпывает всего прикладного значения геотермических исследований. В последние десятилетия человечество особенно остро ощутило, что топливные и гидроэнергетические ресурсы нашей планеты ограничены, а постоянно растущие темпы развития экономики требуют дальнейшего расширения ее энергетической базы. Взоры науки и техники обратились к тем, поистине неисчерпаемым источникам энергии — к энергии ядерных превращений, солнечному теплу и геотермальным ресурсам.

На современном этапе технически наиболее приемлемым способом освоения тепловой энергии недр оказывается использование тепла, аккумулированного подземными водами и парами. Поэтому выявление геотермальных ресурсов — это второй, столь же важный, как и первый, вид приложения геотермических исследований к проблемам практики. Он сводится к увязке результатов исследований с материалами изучения природных водонапорных систем. Комплексный анализ геотермических и гидрогеологических данных выявил различные категории геотермальных ресурсов, определил конкретные участки возможного строительства геотермальных электростанций, теплофикационных сетей, парниково-тепличных хозяйств и других объектов на базе использования горячих вод и паров.

Раньше всего геотермальная теплоэнергетика приняла промышленные масштабы в странах относительно бедных другими видами энергетических ресурсов — в Италии, Исландии, Новой Зеландии. Эти страны расположены в зоне новейшего вулканизма, изобилующей горячими источниками, гейзерами, действующими вулканами. Позже такие работы начались и в других районах мира с аналогичными природными условиями — в Японии, Мексике, Сальвадоре, на западе США.

Успешно развивается это направление и у нас в СССР. Опыт региональных геотермических и гидрогеологических исследований, накопленный советской наукой, суммирован в сериях геотермических карт, созданных в Лаборатории геотермии Геологиче-

ского института АН СССР, а также в недавно опубликованной «Карте термальных вод СССР» 1:2500000 масштаба, составленной большим коллективом исследователей под руководством Ф. А. Макаренко и Б. Ф. Маврицкого. Эта карта отражает распределение напорных систем термальных вод на территории нашей страны и свидетельствует о возможности того или иного вида их теплоэнергетического использования во многих районах Кавказа, Крыма, Средней Азии, Западной и Восточной Сибири, Дальнего Востока.

На базе выявленных геотермальных ресурсов проектируются, а частично уже организованы теплично-парниковые хозяйства на Кавказе (г. Грозный и др.), Камчатке (крупнейший Паратунский комбинат на 60 тыс. м² укрытого грунта) и в других районах страны; осуществлены теплофикация, горячее водоснабжение предприятий и жилых домов (Махачкала, Тбилиси, Ташкент, Омск, многие курорты). В 1966 г. на Камчатке введена в строй первая в СССР опытно-промышленная Паужетская геотермальная электростанция мощностью 5 000 квт, турбины которой вращает природный пар, а в 1967 г. там же успешно испытана Паратунская ГЕОТЭС, на которой в качестве рабочего тела используется низкокипящий промежуточный теплоноситель.

Современные установки работают на тепле подземных вод, на природном паре. С точки зрения техники — это «низкопотенциальные теплоносители». Еще выгодней использовать тепло магматических расплавов, нагретых гораздо больше. Во многих районах мира, подобных нашей Камчатке, магмы подступают к поверхности земли, заполняя промежуточные камеры вулканических аппаратов, и постоянно грозят разрушительными извержениями. Если же решить проблему отбора тепла из недр вулкана, можно покончить с угрозой внезапных катастроф и подчинить эту энергию человеку. Такая идея, ранее питавшая воображение одних фантастов, в наши дни становится реальной научно-технической задачей. Горячим ее сторонником был советский вулканолог В. В. Аверьев, предположивший разбурить промежуточ-

ный очаг под Авачинским вулканом, вблизи г. Петропавловска. На базе магматического тепла, указывал он, здесь могла бы в течение не менее 50 лет работать электростанция мощностью в 1 млн квт.

В будущем внутриземное тепло, безусловно, будет широко использоваться в энергетике, и освоение этого нового вида энергии составляет важнейшую практическую задачу геотермических исследований.

УДК 550.36