

## Badania geofizyczne w rozwiązywaniu problemów cywilizacyjnych istotnych dla Polski

Marek Jarosiński<sup>1</sup>, Janusz Krzyściński<sup>2</sup>, Zbigniew Ustrnul<sup>3</sup>, Krzysztof Kochanek<sup>2</sup>, Tomasz Janik<sup>2</sup>



M. Jarosiński



J. Krzyściński



Z. Ustrnul



K. Kochanek



T. Janik

**Geophysical research in solving civilization problems relevant to Poland.** *Prz. Geol.*, 71: 418–429.

*Abstract.* In view of the challenges faced by geophysical research in the future decades and the observed decline in interest in this field of study in Poland, it is necessary to mobilize the geophysical environment. One of the main causes of the crisis in the popularity of this field of study are changes in the economic paradigm, in which an important determinant and goal of activities is the declared departure from fossil fuels, especially coal and oil. Obviously, this has a direct impact on the prospects of geophysical research, whose main contractor on a global scale is the oil industry. With the depletion of the best available deposits, there is a need to reach for deposits that were increasingly difficult to discover and exploit, which contributed to the progress in geophysical research methods that followed the development of technology and information methods – the basis of modern geophysical analyses.

The announced definitive departure from fossil fuels coincided in Poland with the end of the shale-gas boom and the announcement of the program of resigning from coal mining. These announcements aroused the belief that the demand for geophysical research will also expire in the coming years together with the prospects for financing such research. However, this belief is wrong. A significant stream of funds will be directed at the development of geophysical research on a global scale, and the current sponsors of utilitarian geophysical research will occupy new niches on the market, e.g. in the accumulation of energy, storage of greenhouse gases and the search for raw materials, the lack of which is increasingly felt by the most developed economies. Along with the growing awareness of the deepening climate crisis and the destruction of the natural environment engulfing the planet, the need increases to recalculate the environmental costs of economic activity, in which broadly understood geophysical sciences can undoubtedly help.

Geophysical analysis of huge datasets requires modern computational methods such as numerical modelling, machine learning and artificial intelligence. The development of these fields will therefore be necessary, but also a difficult challenge for the scientific community in Poland.

In this work, we will indicate mainly the prospective areas of the economy and the science, related to the broadly understood energy transformation that requires a significant share of geophysical research. The review of the issues and methodology of current geophysical problems and proposed solutions has been arranged in accordance with the directions of research in the field of earth sciences, subjectively highlighting the tasks that seem to be the most promising and/or scientifically attractive.

The text deals with the issues related to climatology, hydrology and hydrogeology, environment, geological hazards, renewable and non-renewable energy sources, waste storage, energy storage, critical raw materials, and the structure and physical condition of the Earth's crust.

**Keywords:** geophysics, climate change, energy transformation, water resources, underground storage, digital transformation

Tekst ten stanowi rezultat refleksji nad problemami cywilizacyjnymi istotnymi dla Polski najprawdopodobniej w najbliższych latach, w których rozwiązaniu mogą odegrać rolę szeroko pojęte badania geofizyczne. Wydaje się, że wobec wyzwań stojących przed badaniami geofizycznymi w następnych dziesięcioleciach i obserwowanego w Polsce spadku zainteresowania tym kierunkiem studiów, potrzebna jest mobilizacja środowiska geofizycznego. Uważamy, że jedną z głównych przyczyn kryzysu popular-

ności tego kierunku studiów są zmiany paradygmatu gospodarczego, w którym ważnym wyznacznikiem i celem działań jest deklarowane odejście od paliw kopalnych, w tym zwłaszcza od węgla i ropy naftowej. Ma to bezpośrednie przełożenie na perspektywy badań geofizycznych, których głównym kontrahentem w skali globalnej jest przemysł naftowy. Wraz z wyczerpywaniem się najłatwiej dostępnych złóż pojawiła się konieczność sięgania po zasoby kopalnin coraz trudniejsze do odkrycia i eksploatacji, która

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00–975 Warszawa; mjar@pgi.gov.pl

<sup>2</sup> Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, ul. Księcia Janusza 64, 01–452 Warszawa; jkrzys@igf.edu.pl; kochanek@igf.edu.pl; janik@igf.edu.pl

<sup>3</sup> Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, ul. Gronostajowa 7, 30–387 Kraków; zbigniew.ustrnul@uj.edu.pl

przyczyniła się do rozwoju metod badań geofizycznych. Rozwój ten był równoległy z postępem technologii i metod informatycznych, będących podstawą współczesnych analiz geofizycznych. Zapowiedź definitywnego odejścia od paliw kopalnych zbiegła się w Polsce z końcem boomu łupkowego i ogłoszeniem programu wygaszania górnictwa węglowego. Zapowiedzi te wzbudziły przekonanie, że również zapotrzebowanie na badania geofizyczne będzie w najbliższych latach zanikać, a wraz nim perspektywy finansowania takich badań. Przypuszczamy jednak, że przekonanie to jest błędne.

Spodziewamy się, że w skali globalnej na rozwój badań geofizycznych będzie skierowany znaczny strumień funduszy. Dotychczasowi główni sponsorzy użytecznych badań geofizycznych zajmą na rynku nowe nisze, np. w akumulowaniu energii i składowaniu gazów cieplarnianych. Wraz ze wzrastającą świadomością pogłębiającego się kryzysu klimatycznego i ogarniającego planetę zniszczenia środowiska naturalnego upowszechnia się pogląd o konieczności skalkulowania na nowo środowiskowych kosztów działalności gospodarczej. Uświadamiamy sobie, że każdy produkt wraz z jego opakowaniem wywiera presję na środowisko, a koszty likwidacji jej skutków są ogromne. Jest zatem nieuniknione, aby opłaty środowiskowe w coraz większym stopniu uwzględniały, dotychczas pomijane, efekty antropopresji. Opłaty powinny być w znacznej części skierowane na rzecz neutralności klimatycznej i ochrony środowiska, w tym na rozwój zielonych technologii, działania łagodzące zmianę klimatu, wdrażanie środków adaptacyjnych, magazynowanie, przetwarzanie i składowanie substancji użytecznych oraz szkodliwych. Działania takie, aby były efektywne i bezpieczne, w skali globalnej i regionalnej, a także dla przyszłych pokoleń, będą wymagały pogłębienia wiedzy o procesach chemiczno-fizycznych zachodzących w atmosferze Ziemi i wszechstronnego rozpoznania struktury stanu fizycznego jej skorupy.

Wraz ze zwiększaniem się mocy obliczeniowych komputerów jesteśmy świadkami bezprzykładnego przyspieszenia w rozwoju metod analiz geofizycznych. Stąd przekonanie, że uczestnictwo w rozwoju badań geofizycznych będzie ważne dla postępu cywilizacyjnego i gospodarczego kraju. Geofizyczne analizy ogromnych zbiorów danych odwołują się do nowoczesnych metod obliczeniowych, takich jak modelowanie numeryczne, uczenie maszynowe i sztuczna inteligencja. Rozwijanie tych dziedzin w najbliższej przyszłości będzie koniecznością, a jednocześnie trudnym wyzwaniem dla środowisk naukowych w Polsce. Pytanie, czy i w jakim stopniu środowisko polskich geofizyków będzie brało udział w tym procesie.

W przeglądzie tym wskażemy głównie perspektywiczne dziedziny gospodarki i wspierającej ją nauki, które są związane z szeroko pojętą transformacją energetyczną, i w których widzimy istotny udział badań geofizycznych. Ze względu na szeroki zakres takich badań, przegląd nasz będzie niekompletny. Celowo pominiemy najbardziej standardowe i powszechnie stosowane badania, takie jak wykonywane na rzecz górnictwa, w tym również skał i kruszyw, oraz związane z zastosowaniami inżynierskimi, na które popyt wzrasta wraz z rozwojem polskiej gospodarki. Dla zachowania spójności tekstu, zogniskowanego na badaniach użytecznych, pominiemy szeroką gamę ważnych badań podstawowych, których znaczenie użytkowe odkryjemy

prawdopodobnie w przyszłości. Przegląd ten uporządkowaliśmy zgodnie z kierunkami badań w obrębie nauk o Ziemi, mając świadomość, że kierunki te zachodzą na siebie, a wówczas dobór problemów na styku dyscyplin jest subiektywny. Subiektywnie uwypukliliśmy również te zadania, które wydają nam się najbardziej perspektywiczne lub też atrakcyjne naukowo.

## KLIMATOLOGIA

Nauka dostarcza niezbitych dowodów, że zmiany klimatyczne zachodzące w XX i XXI w. są związane z działalnością człowieka. Spalanie paliw kopalnych było i nadal jest podstawowym źródłem napędu globalnej gospodarki, czego spektakularnym wyrazem jest szybko rosnąca koncentracja składników gazowych w atmosferze (tzw. gazów cieplarnianych), które ocieplają atmosferę, lądy i oceany, ograniczając swobodne wypromieniowanie energii w przestrzeń kosmiczną.

Według stanu wiedzy z sierpnia 2021 r., przedstawionego w 6. Raporcie I Grupy Roboczej Międzyrządowego Panelu Ekspertów ds. Zmiany Klimatu (IPCC WG1), globalna temperatura powierzchni Ziemi wzrosła od czasów preindustrialnych o ok. 1°C, do czego w znacznej mierze przyczyniła się rosnąca emisja gazów cieplarnianych. Tempo obecnej zmiany klimatu nie miało precedensu w ostatnich dwóch tysiącletniach. Niezaprzeczalnym faktem jest to, że wzrost emisji gazów cieplarnianych spowoduje w przyszłości dodatkowe ocieplenie. W niektórych regionach (w tym w Polsce) przewidywany jest wzrost częstotliwości i intensywności ekstremów ciepła, nawałnych opadów, susz rolniczych, hydrologicznych i środowiskowych oraz zwiększenie liczby cyklonów tropikalnych zaliczanych do kategorii silnej lub bardzo silnej. Na półkuli północnej nastąpi zmniejszenie powierzchni zlodzenia mórz Arktyki i pokrywy śnieżnej, a także rozległości obszaru wieloletniej zmarzliny. Niekontrolowana emisja CO<sub>2</sub> doprowadzi w najbliższych dekadach do katastrofy, której można uniknąć tylko przez znaczną redukcję emisji CO<sub>2</sub> i innych gazów cieplarnianych. Jeśli globalne ocieplenie przekroczy próg wzrostu temperatury o 1,5–2,0°C w stosunku do tej z epoki przedindustrialnej, to nastąpi nieodwracalna zmiana klimatu, zagrażająca istnieniu cywilizacji.

Zmiany klimatu obserwowane w skali kraju, obejmującej przestrzeń kilkuset tysięcy kilometrów kwadratowych, łączą w sobie globalne, antropogeniczne wymuszanie ocieplenia klimatu z lokalnymi procesami zachodzącymi w

- ❑ Identyfikacja *hot spotów* klimatycznych na terenie Polski i ich ewolucji w XXI w., bazując na scenariuszach globalnych zmian w emisji gazów cieplarnianych
- ❑ Optymalizacja wykorzystania odnawialnych źródeł energii w warunkach zmieniającego się klimatu i potrzeb energetycznych kraju
- ❑ Ocena, w jakim stopniu zmiany klimatu w XXI w. będą stanowiły zagrożenie dla niektórych działów gospodarki (rolnictwo, leśnictwo, energochłonne działy gospodarki)
- ❑ Określenie możliwości zastosowania geoinżynierii pogody i klimatu na obszarze Polski

dynamice atmosfery, które mogą wzmacniać (lub osłabiać) tendencje lokalnych zmian parametrów klimatycznych. Pożądana jest ocena, czy w skali Polski występują obszary o specyficznych zmianach klimatu i na ile trwałe okażą się obserwowane obecnie anomalie klimatyczne. W osiągnięciu tego celu będzie pomocne numeryczne modelowanie zmian klimatu z zastosowaniem różnych scenariuszy przyszłych, globalnych zmian w emisji gazów cieplarnianych.

Przed geofizykami staje wyzwanie oceny zakresu przewidywanych zmian w parametrach meteorologicznych w skali dziesięcioleci i identyfikacja rejonów kraju szczególnie narażonych na zmiany klimatyczne. Przedmiotem zainteresowania geofizyków będzie ocena lokalnej specyfiki klimatycznej różnych regionów kraju w całym XXI w., czyli badanie zarówno zmian w ekstremach pogodowych (np. w częstotliwości nawałnych opadów, fal ciepła i chłodu, intensywności huraganów i burz), jak i symulacje procesów klimatycznych ważnych z punktu widzenia funkcjonowania gospodarki w XXI w. (np. zmiana w strukturze opadowej, zróżnicowanie trendów temperaturowych w kraju, przesunięcie stref klimatycznych na północ, połączone z wydłużeniem okresu wegetacyjnego, komplementarne i efektywne wykorzystanie energii wiatru, Słońca i innych odnawialnych źródeł energii w dążeniu do osiągnięcia zerowej emisyjności gospodarki).

Ostatnio rozważa się zastosowanie inżynierskich metod chłodzenia atmosfery (np. przez zwiększenie odbicia promieniowania słonecznego w przestrzeń okołozemską, zasiewanie chmur lub wprowadzenie aerozolu siarczynowego do stratosfery) i zwiększenie pochłaniania gazów cieplarnianych przez biosystem (np. wzrost masy mikroorganizmów pochłaniających CO<sub>2</sub> przez użyżnianie oceanów związkami żelaza). Prezentowane pomysły nie wyszły poza sferę projektów oraz prób pilotażowych i nie są gotowe do masowego zastosowania. Współpraca geofizyków, chemików oraz biologów z inżynierami pozwoli uściślić wizje projektów i na wstępie wyeliminować utopijne koncepcje. Ingerencja w klimatyczną rzeczywistość stanowi wyzwanie dla nauki i może doprowadzić do integracji wielu jej dziedzin. Będzie to niewątpliwym impulsem do rozwoju badań nad klimatem.

## HYDROLOGIA I HYDROGEOLOGIA

Polska uchodzi za najmniej zasobny w wodę kraj Europy. Średnie zasoby odnawialne wód na mieszkańca Polski, według danych Eurostatu, wynoszą niecałe 1600 m<sup>3</sup>/os./rok. W związku z rozwojem gospodarki zapotrzebowanie na wodę będzie wzrastać, natomiast jej dostępność, szczególnie wody najwyższej jakości, może się zmniejszać. Zmusza to decydentów i naukowców do coraz precyzyjniejszego rozpoznania zasobów wody, opracowania możliwie obojętnych dla środowiska metod gospodarowania wodą oraz szukania nowych sposobów retencji wód w naszym kraju. Zgodnie z тезami przedstawionymi w raporcie syntetycznym *Gospodarowanie wodą – wyzwania dla Polski* można wyróżnić trzy podstawowe kategorie problemów, z którymi mierzymy się i będziemy się mierzyć w najbliższej przyszłości: niedobór wody, jej nadmiar oraz niewystarczająca jakość.

Założono, że do roku 2027 retencja wód w Polsce ma być zwiększona do 15%, w związku z tym już obecnie

- ❑ Rewitalizacja mokradeł i koryt rzecznych w celu odtworzenia naturalnych środowisk, intensyfikacji retencji wód opadowych i ograniczenia sezonowych wylewów z rzek
- ❑ Prognozowanie długookresowych trendów zmian zasobów powierzchniowych i podziemnych wód użytkowych
- ❑ Dokładniejsze rozpoznanie cyrkulacji wód głębinowych i ich wymiany z wodami gruntowymi
- ❑ Zintegrowanie analiz hydrologicznych z naukami biologicznymi w celu głębszego zrozumienia funkcjonowania złożonych systemów naturalnych

poszukuje się sposobów, aby spełnić to ambitne założenie. Jedną z metod jest zwiększenie retencyjności dolin rzecznych poprzez rewitalizację terenów podmokłych oraz budowę nowych, małych (zwłaszcza na terenach zurbanizowanych) i dużych zbiorników retencyjnych, przy czym te ostatnie mają możliwie najmniej ingerować w naturalną dolinę rzeczną.

Prognozowanie trendów w użytkowaniu wód powierzchniowych i podziemnych jest kluczowym wyzwaniem współczesnej gospodarki wodnej oraz hydrologii. Sprostanie temu wyzwaniu wymaga porozumienia hydrologów, planistów, urbanistów, socjologów i specjalistów w zakresie przemysłu (w tym przede wszystkim energetycznego), a także rolników. Obecnie każda z tych grup fachowców podejmuje decyzje niezależnie, co prowadzi do problemów niedoboru wody w studniach (np. do chłodzenia turbin lub nawadniania upraw), podtapiania nieruchomości lub konieczności dostarczania wody dobrej jakości na duże odległości. Koordynacja działań prawie każdej z gałęzi gospodarki powinna zatem zaczynać się od rozpoznania zasobów wodnych dostępnych nie tylko w momencie rozpoczęcia inwestycji, ale i w całym cyklu jej użytkowania.

Cyrkulacja wód głębinowych na Niżu Polskim, pod szczelnym ekranem ewaporatów cechsztynu, jest bardzo ograniczona, choć zachodzi w sąsiedztwie granic jego zasięgu. W całej mezozoicznej i kenozoicznej pokrywie osadowej lub w obszarach pozbawionych ekranu cechsztyńskiego, ze względu na występowanie wielu horyzontów uszczelniających i wodonośnych, cyrkulacja wód głębinowych jest bardziej skomplikowana. Lokalnie powstają przepływy ascenzyjne, w których wody głębinowe przeciekają do wód płytszych, i descenzyjne, które powodują anomalie zasolenia w warstwach wodonośnych, rozpoznawane metodami geofizycznymi.

Komplementarnym wyzwaniem jest określenie dróg filtracji wód głębinowych, którymi często są uskoki lub strefy przy wysadach solnych. Przepuszczalność stref uskokowych i spękań seryjnych w warstwach uszczelniających jest coraz częstszym przedmiotem badań również w odniesieniu do lokalizacji magazynów i składowisk podziemnych. Ze względu na niejednorodność stref uskokowych i ich współczesną mobilność jest to trudne zadanie, wymagające zastosowania nowoczesnych i rozdzielczych metod geofizycznych. Charakterystyka petrofizyczna kolektorów i uszczelnień w połączeniu z danymi o anomaliami



zasolenia powinny w efekcie umożliwić skonstruowanie modeli kierunków i tempa filtracji wód głębinowych. Wymaga to również rozpoznania gradientów ciśnień i mechanizmów je powodujących. W zaawansowanym stadium analiz modele wód głębinowych powinny utworzyć jeden system hydrauliczny z poziomami wód słodkich i powierzchniowych.

## OCHRONA ŚRODOWISKA

Wzrost zapotrzebowania na energię w Polsce, pomimo wprowadzenia na początku lat 90. XX w. ograniczeń w przemyśle ciężkim i wdrażania nowocześniejszych technologii, rekompensowany był głównie przez spalanie paliw kopalnych. Jest to nasz wkład nie tylko do ocieplenia klimatu, ale również do lokalnie katastroficznego zanieczyszczenia powietrza pyłami atmosferycznymi. Szczególnie szkodliwa dla zdrowia jest niska emisja z gospodarstw domowych ogrzewanych węglem lub drewnem. Także stan wód powierzchniowych, jakkolwiek uległ polepszeniu, nadal pozostawia dużo do życzenia.

- ❑ Monitorowanie zanieczyszczenia powietrza przez pyły i substancje gazowe w skali lokalnej
- ❑ Rozpoznanie zanieczyszczenia rzek i wód podziemnych oraz prognozowanie ich skutków
- ❑ Wykrywanie zanieczyszczenia gleb uprawnych i biotopów ekosystemów naturalnych
- ❑ Badanie mechanizmów wycieku płynów ze składowisk i magazynów w przestrzeni podziemnej

Wiodącą rolę w ochronie środowiska powinny odgrywać dyscypliny nauki związane z innowacjami technologicznymi zmierzającymi do wyeliminowania źródeł zanieczyszczeń, zmniejszania energochłonności przemysłu i oszczędności energii. Badania geofizyczne będą jedynie narzędziem do oceny skuteczności wprowadzonych procedur administracyjnych i nowych technologii. W związku z tym przewiduje się szersze wykorzystanie obserwacji satelitarnych prowadzonych z dużą rozdzielczością, z zastosowaniem wielokanałowych spektrofotometrów oraz techniki dronowej do monitoringu ognisk i źródeł zanieczyszczenia.

Starannego monitoringu chemicznej i biologicznej jakości wody, a także rozpoznania źródeł zanieczyszczenia wymagają ciekłe wodne i jeziora wykorzystywane jako rezerwuary wody pitnej. Jest to szczególnie istotne w sąsiedztwie miast, ale też w obszarach o intensywnym rolnictwie wykorzystującym nawozy. Dodatkowych danych może także dostarczyć badanie cyrkulacji wód płytkich, które ze względu na duże zróżnicowanie litologiczne osadów polodowcowych plejstocenu nie jest zadaniem trywialnym. Zastosowanie metod płytkiej geofizyki może mieć kluczowe znaczenie dla rozpoznania złożonej struktury litologicznej, a nawet dla scharakteryzowania jej właściwości petrofizycznych.

Katastrofa ekologiczna, jaką było zanieczyszczenie wód Odry latem 2022 r., pokazała, do czego mogą prowa-

dzić niekontrolowane zrzuty solanek kopalnianych do cieków wód powierzchniowych. Można przypuszczać, że aby zapobiec takim sytuacjom w przyszłości, część solanek będzie zatłaczana z powrotem pod ziemię. Zastosowanie tej praktyki w Arizonie, gdzie zatłacza się pod ziemię solanki wydobywane razem z węglowodorami, spowodowało wzbudzenie wstrząsów o magnitudzie  $>5$  w obszarze o niskiej naturalnej sejsmiczności. O tym, czy w danym obszarze może dojść do takich zjawisk, decyduje naturalny stan naprężeń oraz miejsce i tempo zatłaczania płynów. Określenie warunków bezpiecznego zatłaczania substancji pod ziemię wymaga starannego rozpoznania całego systemu hydrogeologicznego i jego kontekstu geomechanicznego. Większość badań w tym zakresie jest prowadzona metodami geofizycznymi.

## GEOZAGROŻENIA

Zmiany klimatyczne powodują nasilanie się ekstremalnych zjawisk pogodowych. Coraz częstsze i bardziej intensywne zmiany zawadnienia ośrodka geologicznego zwiększają ryzyko uaktywnienia ruchów masowych. Trendy cywilizacyjne wzmagają z kolei zainteresowanie wykorzystaniem głębokiej przestrzeni podziemnej, co może prowadzić do niekorzystnych zmian ciśnień i naprężeń, w tym do wystąpienia zjawisk sejsmicznych. Wzrasta świadomość, że do opracowania bardziej szczegółowych (adekwatnych) sposobów ograniczania tych zagrożeń lub przynajmniej zmniejszenia ich skutków potrzebne jest badanie fizycznej natury takich zjawisk.

- ❑ Rozpoznanie dynamiki i genezy ruchów masowych
- ❑ Prognozowanie wstrząsów sejsmicznych indukowanych działalnością górnictwem (z rozpoznaniem naturalnego czynnika naprężeń tektonicznych) i minimalizowanie ich skutków
- ❑ Wpływ podnoszenia poziomu wód złożowych na obszarach zamykanych kopalń na cyrkulację wód gruntowych i destabilizację górotworu

W Polsce osuwiska występują przede wszystkim w obszarach górskich, w tym głównie w Karpatach fliszowych. Pojawiają się również na skarpach rzecznych i klifach Bałtyku. Badania mechanizmów osuwisk i zrozumienie ich dynamiki są w naszym kraju w stadium początkowym. Wymagają one użycia złożonych modeli geomechanicznych, uwzględniających procesy zmiany spójności prowadzące do uwodnienia, pęcznienia i odkształceń plastycznych. Rozpoznanie przyczyn i dynamiki ruchów masowych wymaga zebrania danych o budowie i właściwościach ośrodka geologicznego, w szczególności o warunkach wodnych. Metody płytkiego sondowania geofizycznego o wysokiej rozdzielczości powinny odgrywać decydującą rolę w rozpoznaniu struktury osuwisk, ich nawodnienia, a także właściwości petrofizycznych i hydrodynamicznych.

Na obszarze Polski, ze względu na relatywnie rzadką sieć permanentnych stacji sejsmicznych i małą naturalną

aktywność sejsmiczną, parametry te są słabo rozpoznane. Jednak nawet na obszarach o małej aktywności sejsmicznej rozpoznanie mechanizmów słabych wstrząsów ma duże znaczenie dla scharakteryzowania współczesnego stanu naprężeń skorupy ziemskiej. Postęp w tej dziedzinie może się dokonać dzięki rozstawieniu większej liczby stacji rejestrujących wstrząsy o magnitudzie większej od 0,5, co obecnie jest czynione na terenie naszego kraju. Naturalny poligon geodynamiczny jest projektowany w Sudetach – na obszarze o potencjalnie największym naturalnym zagrożeniu w Polsce. Stacje takie są i będą instalowane w obszarach podziemnych i naziemnych inwestycji.

Interpretacja słabych zjawisk sejsmicznych i ich rozpoznawanie będą wymagać pokonania problemów związanych z zaszumionym sygnałem sejsmicznym. Ważne będzie wybranie odpowiedniej lokalizacji i sposobu zainstalowania czujników drgań. Rozpoznanie właściwości sprężystych podłoża, w szczególności jego tłumienia, wymaga specjalnych badań geofizycznych, głównie za pomocą technik płytkiej sejsmiki. W tym zakresie niedostatecznie są wykorzystane dane firm geofizycznych wykonujących profilowania sejsmiczne.

Wstrząsy sejsmiczne indukowane działalnością górniczą staną się poważnym zagrożeniem dla wielu aglomeracji miejskich na terenach górniczych i pogórnich. Można przewidywać, że nawet po zakończeniu eksploatacji kopalń nie wygasną one szybko, gdyż procesy naprężeniowo-deformacyjne, w tym związane z zakończeniem pompowania wód i wyrównywaniem ich poziomu, będą destabilizowały górotwór. Szczególnie boleśnie doświadczają tego mieszkańcy Trzebini, w której po zakończeniu wydobywania węgla płytkimi wyrobiskami podnoszący się poziom wód gruntowych doprowadził do subrozji nadkładu złoża i powstania głębokich zapadlisk. Prognozujemy zatem, że, aby zapobiec destrukcyjnym skutkom likwidacji kopalń, nieodzowne staną się długotrwałe monitorowanie i analiza dynamiki obszarów pogórnich metodami geofizycznymi. Zmiany w górotworze, np. powodowane przez podnoszenie się poziomu wód głębinowych i gruntowych, powinny być antycypowane i w większym stopniu uwzględniane w działaniach likwidacyjnych.

Na terenach górniczych naturalne tło geodynamiczne jest relatywnie słabo rozpoznane z powodu zagłuszenia przez zjawiska antropogeniczne. Nieliczne dane dotyczące tego tła są niespójne w skali bloków tektonicznych, dlatego analiza tektonicznej składowej mechanizmu wstrząsów sejsmicznych może mieć w tym kontekście duże znaczenie. Badania sejsmologiczne będą mogły dostarczać kluczowych danych do wtórnego wykorzystania wyrobisk górniczych lub naturalnych struktur geologicznych, na przykład jako składowiska odpadów lub magazyny energii. Nowoczesne górnictwo naftowe często wykorzystuje metodę stymulacji złóż poprzez szczelinowanie hydrauliczne kolektorów. Wzrost ciśnienia porowego podczas tych zabiegów wzbudza liczne mikrowstrząsy, ale sporadycznie na powierzchni terenu mogą być odczuwalne również silniejsze wstrząsy. W przypadku systemów geotermalnych stymulowanych szczelinowaniem hydraulicznym, ze względu na większą objętość płynów używanych w tych zabiegach, odczuwalne wstrząsy nie należą do rzadkości.

## ODNAWIALNE ŹRÓDŁA ENERGII

Stan rozpoznania szybko ocieplającego się klimatu Ziemi wskazuje, że główną przyczyną tego katastroficznego zjawiska jest emisja gazów cieplarnianych ze spalanych paliw kopalnych. Wiodące światowe gospodarki, w największym stopniu odpowiedzialne za to zjawisko, podejmują działania zmierzające do jak najszybszej redukcji zużycia paliw kopalnych w przemyśle energetycznym i transporcie. Znaczna część klasycznej energetyki będzie sukcesywnie zastępowana przez niestabilne źródła odnawialne – słońce i wiatr – a to z kolei będzie wymagało akumulowania energii na niespotykaną do tej pory skalę. Wydaje się, że mimo nieodwracalnego trendu odchodzenia w energetyce od surowców kopalnych, niezależnie od ambitnych założeń Unii Europejskiej, jeszcze przez długi czas będą one odgrywały istotną rolę.

W 2020 r. odnawialne źródła energii (OZE) dostarczyły ok. 14% całkowitej produkcji energii elektrycznej w Polsce. Największy udział w OZE, tj. 64%, miała energetyka wiatrowa, 16% udziału to spalanie biomasy, głównie drewna (istnieją jednak kontrowersje, czy spalanie drewna z wycinki lasów można zaliczyć do OZE), 10% wyprodukowały elektrownie wodne, 7% – fotowoltaika i 3% pochodziło z biogazu. Polityka państwa ma decydujący wpływ na zwiększenie udziału OZE w bilansie energetycznym kraju.

- Gwałtowny rozwój prosumenckiej energetyki słonecznej
- Potencjał małych elektrowni wodnych
- Spontaniczny rozwój prosumenckiej płytkiej geotermii z wykorzystaniem pomp ciepła
- Zintegrowane modele produkcji energii elektrycznej i ciepła z wielu źródeł OZE

Ostatnie zawirowania na rynku energii umocniły tendencje uniezależnienia się gospodarstw domowych i małego biznesu od monopolistycznych producentów energii na rzecz OZE. Obserwacje klimatyczne pozwoliły zidentyfikować rejony kraju szczególnie wydajne w pozyskaniu energii wiatrowej i instalacji fotowoltaicznej. W celach prosumenckich energię elektryczną z wiatru i Słońca można produkować prawie w każdym miejscu w Polsce. Boom fotowoltaiczny obserwuje się w Polsce od 2015 r. W tym czasie liczba prosumentów wzrosła z 4 do 688 tysięcy na koniec 2021 r. Powstały wielohektarowe farmy fotowoltaiczne i planowany jest też rozwój energetyki wiatrowej na Bałtyku.

Przyszłość rozwoju OZE należy do klastrów prosumenckich funkcjonujących w gminach lub małych miastach, które na bieżąco produkują energię ze źródeł odnawialnych na potrzeby lokalne i tylko w niewielkim stopniu przesyłają ją do krajowej sieci, a w przypadku nadprodukcji magazynują. Sterowanie taką siecią wymaga prognozowania promieniowania słonecznego i prędkości wiatru. Jest to zadanie dla geofizyków atmosfery – podobnie jak i krótkoterminowa (co 15 minut) prognoza tych elementów meteorologicznych z wykorzystaniem lokalnej sieci pomiarowej i satelitarnych obrazów zachmurzenia.

Prognoza produkcji elektryczności z OZE jest konieczna dla efektywnego sterowania przesyłem energii w ramach grupy prosumenckiej, zgodnie z przewidywanym zapotrzebowaniem lokalnych użytkowników i chwilowymi fluktuacjami mocy OZE u indywidualnych producentów. Gdy warunki produkcji energii są optymalne, przestarzałe sieci przesyłowe i brak przewidywania intensywności produkcji prądu powodują, dotkliwie dla prosumentów, blokady w odbiorze energii.

Polska charakteryzuje się bardzo niekorzystnymi warunkami geograficznymi i hydrologicznymi do pozyskiwania energii elektrycznej z cieków wodnych. Nizinny bieg rzek i ich niewielkie przepływy przekładają się na mały udział procentowy energii z hydroelektrowni (ok. 2%) w krajowej produkcji energii. Wpływ na ten stan rzeczy, oprócz przyczyn naturalnych, mają gigantyczne nakłady inwestycyjne, jakie należałoby ponieść podczas budowy dużych hydroelektrowni, oraz znaczna ingerencja w środowisko naturalne takich przedsięwzięć.

Hydroelektrownie, które obecnie działają w Polsce, są zlokalizowane przede wszystkim w takich zlewniach, gdzie naturalny spadek zwierciadła wody jest znaczny (w rejonach górskich i podgórskich) lub towarzyszą one specjalnie budowanym zbiornikom na rzekach nizinnych. Zbiorniki te nie tylko gromadzą spiętrzoną wodę dla elektrowni, ale na ogół pełnią kilka innych funkcji (rekreacyjną, przeciwpowodziową i retencyjną). Dodatkowym problemem jest zbyt długi średni wiek dużych elektrowni wodnych i często zły stan techniczny ich infrastruktury (zapór hydroelektrowni, dna zbiorników, turbin, przepławek itp.), dlatego należałoby zbadać potencjał budowy małych elektrowni wodnych, o mocy kilku MW. Obecnie istnieją firmy komercyjne dostarczające stosunkowo niedrogi sprzęt techniczny do takich niewielkich (przydomyowych) elektrowni, jak również występują niewykorzystane miejsca, które gwarantują rentowność takich inwestycji. Wybudowane w tym celu małe zbiorniki retencyjne mogłyby przy okazji zostać włączone do sieci programu zwiększenia małej retencji w Polsce. Inwestycje tej skali można by oprzeć na zaangażowaniu prywatnego kapitału prosumentów, choć i one wymagałyby pewnie wsparcia państwa, tak jak fotowoltaika i geotermia.

Pośród odnawialnych źródeł energii geotermia należy do tych najstabilniejszych, ale jej odnawialność jest warunkowa. W Polsce energia przeciętnego strumienia ciepłego jest wykorzystywana jedynie do produkcji ciepła. Płytką geotermia może być istotnym, dodatkowym źródłem energii dla naszego kraju, wymagającym jednak wspomaganie pompami cieplnymi zasilanymi z innych źródeł. Jej ważną zaletą jest rozproszenie inwestycji pomiędzy tysiącami indywidualnych inwestorów. Szybki rozwój płytkiej geotermii w Polsce sprawia, że konieczne jest zintensyfikowanie badań optymalizujących wykorzystanie ciepła Ziemi. Dopasowanie technologii do naturalnych warunków geologicznych będzie wymagało szczegółowego rozpoznania właściwości gruntów i przepływu wód gruntowych. Wraz z rozwojem takiej geotermii na dużą skalę będą się nasilały konflikty interesów pomiędzy jej użytkownikami, których rozstrzygnięcie, jak również doprecyzowanie rozwiązań legislacyjnych, będzie wymagało zastosowania modeli przepływu ciepła sprzężonego z przepływami wód porowych, uwzględniających technologie instalacji geotermal-

nych. Zarówno rozpoznanie właściwości termicznych, przepływów i budowy geologicznej, jak i teoretyczne aspekty modelowania sprzężonych oddziaływań są ambitnymi wyzwaniami dla geofizyków.

Geotermia głęboka, ze względu na większą skalę indywidualnych inwestycji i podwyższone ryzyko geologiczne, wynikające ze słabszego rozpoznania głębokich struktur i z zatykania instalacji minerałami strącanymi z solanki, wydaje się mniej obiecującym źródłem energii niż geotermia płytka. Dodatkowo w żadnym kraju poza Islandią nie stanowi ona istotnego składnika mixu energetycznego, nawet tam, gdzie strumień ciepły jest większy niż w Polsce. Ze względu na przyrost temperatury i ograniczenie przepuszczalności skał wraz z głębokością, zwiększenie znaczenia głębokiej geotermii będzie wymagać zastosowania stymulacji przepływu szczelinowaniem hydraulicznym. Doświadczenia w tej dziedzinie, zdobyte przez firmy naftowe podczas eksploatacji niekonwencjonalnych złóż węglowodorów, rozpowszechniły i udoskonaliły tę technologię, wskazując na geomechaniczne uwarunkowania procesu szczelinowania. Wzrost znaczenia badań geomechanicznych otwiera szeroki front dla interdyscyplinarnych badań geofizycznych i modelowania numerycznego naturalnego i zaburzonego stanu naprężenia w rozwarstwowanym ośrodku. W tym zakresie rola geofizyków jest trudna do przecenienia zarówno na etapie badania naprężeń na podstawie danych otworowych, jak i w modelowaniu sprzężonych oddziaływań porospężystych, termicznych i lepko-plastycznych. Projektując głęboką geotermię w Polsce, w celu zmniejszenia ryzyka nietrafionych instalacji należy uwzględnić większą liczbę czynników niż to jest obecnie praktykowane. W związku z tym należy zabiegać o rozszerzenie zakresu badań w otworach, które w zdecydowanej większości są dofinansowywane z pieniędzy publicznych.

Rozpoznanie skał do celów głębokiej geotermii powinno być nie mniej intensywne niż niekonwencjonalnych złóż węglowodorów, z tą różnicą, że model wymiany ciepła wymaga lepszego rozpoznania parametrów termicznych skał. Dostrzegamy ciągle duże braki w zrozumieniu pomiarów temperatury w otworach wiertniczych, w których dochodzi do wymiany cieczy pomiędzy otworem a przestrzenią porową i szczelinami w skale. Niedostateczne jest rozpoznanie niestacjonarnego stanu termicznego otworu ze względu na schłodzenie lub też wygrzanie skały płuczką. Więcej uwagi powinniśmy poświęcić również niestacjonarnemu profilowi temperatury w górnej skorupie ziemskiej, związanemu z nieskompensowanym wychłodzeniem podczas ostatniego zlodowacenia.

Pojawiają się też nieco futurystyczne koncepcje bardzo głębokiej geotermii (geoplutonika) czerpiącej energię z głębokości 8–10 km. Jednak jej rozwój wymaga postępu technologicznego, umożliwiającego wykonywanie bardzo głębokich otworów niskim kosztem z zastosowaniem materiałów odpornych na wysokie ciśnienie i temperaturę. Konieczne byłoby również rozpoznanie warunków geomechanicznych, w tym uwarunkowanego termicznie pelżania skał.

W wykorzystywaniu geotermii, zarówno płytkiej, jak i głębokiej, konieczne jest określenie maksymalnej wydajności instalacji geotermalnych, powyżej której geotermia przestaje być odnawialnym źródłem energii. Decyduje o tym



cała gama parametrów petrofizycznych, razem z termicznymi i hydraulicznymi, oraz stan fizyczny naturalnego wymiennika ciepła. Analizy takie będą wykorzystywane w celu optymalizacji skonfigurowania geotermii ze źródłami solarnymi i wiatrowymi w danej lokalizacji. Stosując tak złożone instalacje, płytką geotermię można również wykorzystać do akumulowania ciepła. Optymalizacja wielu komponentów systemu w zmiennych warunkach pogodowych wymaga modelowania z uwzględnieniem charakterystyki odbioru energii. Czynniki geotermalne można w tym systemie modyfikować poprzez zmianę obiegu płynów w płytkich otworach lub tempem wydobywania wód termalnych z głębokich otworów, z uwzględnieniem odbudowy temperatury. Udział geofizyków w wieloparametrycznym modelowaniu przepływu i wymiany ciepła w głębi Ziemi wydaje się oczywisty.

### PERSPEKTYWICZNE NIEODNAWIALNE ŹRÓDŁA ENERGII

Wydaje się, że ze względu na konieczność ustabilizowania produkcji prądu i brak akumulatorów o pojemności wystarczającej do magazynowania energii wyprodukowanej z niestabilnych źródeł odnawialnych, nieodnawialne źródła energii jeszcze długo będą miały znaczny udział w energetyce Polski. Przewiduje się, że szczególną rolę w zastępowaniu najbardziej emisyjnych źródeł odegrają energetyka jądrowa i gaz ziemny, uważany za paliwo przejściowe w czasie transformacji energetycznej. W przyszłości, jeśli nadal nie będziemy dysponować w miarę taną technologią usuwania CO<sub>2</sub> ze strumienia spalin lub atmosfery, trzeba będzie zmniejszać udział gazu ziemnego w produkcji energii na rzecz OZE i energetyki jądrowej. Jeżeli infrastruktura do akumulowania energii i składowania CO<sub>2</sub> nie będzie się rozwijać w pożądanym tempie, to również nie będzie można zupełnie wyeliminować innych wysokoemisyjnych źródeł energii. Ze względu na ciągle istotne ograniczenia materiałowe w produkcji i eksploatacji samochodów elektrycznych, które odzwierciedlają się w ich kosztach, napęd spalinowy może nie zostać wyeliminowany w założonym terminie. Przedłuż to żywotność poszukiwań i eksploatacji ropy naftowej względem ambitnych założeń, zwłaszcza że w najbliższych latach zakłada się utrzymanie wzrastającego trendu w wydobywaniu paliwa. W takim

- Rozwój energetyki jądrowej jako stabilnego, niskoemisyjnego źródła energii
- Kontynuacja poszukiwań gazu ziemnego jako paliwa przejściowego
- Perspektywy dalszych poszukiwań ropy naftowej

scenariuszu wzrasta potrzeba składowania CO<sub>2</sub> w strukturach geologicznych.

W Polsce po kilkunastu latach słabo skoordynowanych działań ogłoszono lokalizację budowy pierwszej elektrowni jądrowej. Rozważane są plany budowy kolejnej, dużej elektrowni jądrowej oraz większej liczby małych reaktorów modułowych (SMR). Można zatem przyjąć, że stabilna energetyka atomowa będzie realnym zamiennikiem

części wysokoemisyjnych źródeł energii w naszym kraju. Zarówno w przypadku dużych elektrowni jądrowych, jak i małych ważna jest ich bezpieczna lokalizacja, której kryteria są sformułowane w rozporządzeniach polskich i międzynarodowych. Rola badań geofizycznych w typowaniu usytuowania elektrowni jest wiodąca. Do badań takich należy monitoring sejsmologiczny, określenie kontekstu geodynamicznego z rozkładem współczesnych naprężeń i odkształceń tektonicznych skorupy ziemskiej, rozpoznanie sejsmiczne struktury geologicznej podłoża oraz szeroki zakres płytkich sondowań geofizycznych, wykonywanych w celu ustalenia właściwości gruntu i jego nawodnienia.

Podczas trwającej już półtora roku rosyjskiej agresji na Ukrainę doświadczamy dotkliwych turbulencji w funkcjonowaniu sektora energetycznego paliw kopalnych, a jednocześnie widzimy jego kluczową rolę w utrzymaniu bezpieczeństwa kraju. Pomimo odchodzenia od paliw kopalnych wydaje się, że ich podaż w skali globalnej nie zmniejszy się przez kolejnych kilkadziesiąt lat. Szczególną rolę będzie odgrywał gaz ziemny ze względu na jego użyteczność jako stabilne zastępstwo dla niestabilnych źródeł odnawialnych oraz mniejszą emisję gazów cieplarnianych niż ze spalania innych paliw kopalnych. Łatwo osiągalne złoża węglowodorów są na wyczerpaniu, w związku z tym nawet dla zwykłego utrzymania produkcji energii konieczne będzie rozpoznawanie nowych złóż – coraz trudniej dostępnych. Sięganie po takie cele jest związane z bardziej wyrafinowanymi technikami badań i eksploatacji, stwarzającymi przestrzeń do innowacyjnych działań geofizycznych. Wydaje się, że również w Polsce istnieje potencjał do rozpoznania nowych złóż gazu ziemnego. Najbardziej perspektywiczne są złoża rozproszonego gazu biogenicznego w zapadlisku przedkarpackim, które wymagają niekonwencjonalnych metod eksploatacji. Duży potencjał węglowodorowy może mieć również niższy poziom strukturalny w Karpatach oraz podłożu cechsztynu w Wielkopolsce. W obu przypadkach wyzwaniem dla geofizyków jest poprawa jakości obrazowania sejsmicznego w celu lepszego zlokalizowania obszarów występowania złóż. Przemysł naftowy jest od dawna największym odbiorcą badań geofizycznych i motorem napędzającym ich rozwój.

### PODZIEMNE SKŁADOWANIE SUBSTANCJI SZKODLIWYCH

Ze względu na brak możliwości wyeliminowania emisji CO<sub>2</sub> z wielu energochłonnych procesów technologicznych, w tym z produkcji energii, coraz poważniej jest rozważana możliwość wychwytu i zatłaczania CO<sub>2</sub> pod ziemię. Koncepcja ta staje się realistyczna ze względu na wzrost cen emisji CO<sub>2</sub>, który korzystnie wpływa na opłacalność takiego przedsięwzięcia. Tym bardziej intratne może być składowanie z możliwością wtórnego, częściowe-

- Składowanie CO<sub>2</sub> w wyczerpanych złożach węglowodorów i zbiornikach solankowych
- Składowanie odpadów promieniotwórczych
- Składowanie solanek i innych płynów szkodliwych na powierzchni Ziemi

go wykorzystania CO<sub>2</sub> w przyszłości. Problem składowisk w strukturach geologicznych jest marginalny w technologii CCS, gdyż ok. 70–80% kosztów takiego przedsięwzięcia pochłania wychwytywanie CO<sub>2</sub> ze strumienia spalin. Pozostałe koszty dzielą między siebie transport i składowanie. Nie zmienia to faktu, że szczegółowe rozpoznanie geofizyczne miejsc składowania jest warunkiem projektowania i analizy ryzyka takiego przedsięwzięcia.

Rozwój energetyki jądrowej planowany w Polsce będzie źródłem odpadów promieniotwórczych, które trzeba będzie bezpiecznie składować w głębi ziemi.

Jako naturalne składowiska CO<sub>2</sub> są rozważane wyczerpane złoża węglowodorów oraz poziomy solankowe. Pierwsza z tych opcji należy do bardziej bezpiecznych, gdyż złoża węglowodorów powstałe przed dziesiątkami lub setkami milionów lat występują wyłącznie w szczelnych pułapkach. Jednak ze względu na brak w Polsce dużych złóż węglowodorów składowiska takie będą miały ograniczone zastosowanie. W przypadku składowania dużej objętości CO<sub>2</sub> konieczne będzie wykorzystanie poziomów solankowych.

Bezpieczne, podziemne składowanie CO<sub>2</sub> wymaga spełnienia wielu warunków, w tym odpowiedniej głębokości i temperatury, niezbędnych do utrzymania tego gazu w stanie nadkrytycznym, oraz występowania zamkniętych struktur skał zbiornikowych o dużej przepuszczalności, przykrytych grubymi pakietami skał uszczelniających. Rola geofizyki w rozpoznaniu tych warunków jest podstawowa. Metodyka takich badań jest zresztą dobrze ugruntowana, gdyż jest podobna do stosowanej w poszukiwaniach naftowych. Zasadnicza różnica polega na odwrotnym przepływie substancji płynnych, które są w tym przypadku zatłaczane, a następnie rozchodzą się w obrębie kolektora, podnosząc ciśnienie porowe i destabilizując struktury tektoniczne.

Modele strukturalne składowisk CO<sub>2</sub> wymagają precyzyjnych zdjęć sejsmicznych 3D do uzyskania wiarygodnej geometrii struktury, determinującej jej szczelność i pojemność. Przewiduje się możliwość powtarzania zdjęć sejsmicznych tego samego obszaru w celu śledzenia rozprzestrzeniania się poduszki CO<sub>2</sub> pod ziemią. Wypełnienie modelu wiarygodnymi parametrami petrofizycznymi wymaga wykorzystania pełnej gamy nowoczesnych profilowań geofizycznych i najnowszych metod ich interpretacji. Konieczne jest ponadto wykonanie modelu geomechanicznego, obejmującego m.in. właściwości petrofizyczne, w tym mechaniczne skał zbiornikowych i uszczelniających, ciśnienia porowe oraz współczesne naprężenia tektoniczne.

Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że mimo małej aktywności sejsmicznej Polski, jej pokrywa osadowa i podłoże krystaliczne są naprężone kierunkowo, co warunkuje reaktywację struktur tektonicznych górnej skorupy ziemskiej pod wpływem zatłaczania CO<sub>2</sub>. Poważnym wyzwaniem dla geofizyków jest uwzględnienie w takich modelach anizotropii właściwości petrofizycznych oraz pęcznienia skał osadowych, które mają duży wpływ na relaksację naprężeń tektonicznych.

Lepszego opracowania wymaga sprzężenie modelu mechanicznego z modelem przepływów oraz uwzględnienie reakcji chemicznych CO<sub>2</sub> z płynami porowymi i skałami, przemian fazowych i rozpuszczania CO<sub>2</sub>, które powodują

wzrost gęstości solanki i przyczyniają się do powstawania prądów zstępujących w zbiornikach. Coraz częściej podejmowanym wyzwaniem jest również charakterystyka właściwości stref uskokowych i spękań w kontekście efektywnego uszczelnienia składowisk. W Polsce rozpoznano dużo struktur solankowych, dobrze spełniających warunki składowisk. Zatem głównym czynnikiem ograniczającym ich tworzenie będzie, jak się wydaje, koszt wychwyty CO<sub>2</sub>.

Odrębnym problemem może być wykorzystanie zamkniętych kopalń soli lub wielkośrednicowych otworów w solach do składowania odpadów niebezpiecznych, w tym promieniotwórczych. Badania geofizyczne wykonywane na potrzeby budowy składowisk mają zbliżony zakres do realizowanych przy okazji innych sposobów gospodarowania przestrzenią podziemną. W przypadku składowania w kawernach solnych czynnikiem szczególnym, który musi być brany pod uwagę, jest produkcja ciepła radiogenicznego przez odpady rozgrzewające składowisko i powodujące zmiany właściwości skał, w tym zwłaszcza ewaporatów.

Regulacje prawne obowiązujące w Polsce nie dopuszczają zatłaczania na dużą skalę do głębokiej przestrzeni podziemnej innych niż CO<sub>2</sub> szkodliwych substancji płynnych, trudnych do utylizacji na powierzchni ziemi. Mimo to od 1996 r. w Borzęcinie na monoklinie przedsudeckiej pracuje eksperymentalna instalacja zatłaczająca pod ziemię kwaśne płyny pochodzące z oczyszczania gazu ziemnego. W ten sposób jest jednocześnie podtrzymywane ciśnienie w złożu, co przyczynia się do stymulacji jego eksploatacji. Prowadzone tam badania służą rozpoznaniu rozprzestrzeniania się substancji szkodliwych w przestrzeni porowej i, jak się spodziewamy, odegrają rolę w kształtowaniu polskiego prawa w tym zakresie. Do substancji szkodliwych na powierzchni ziemi, a neutralnych dla głębokich zbiorników podziemnych, należy również, wcześniej wspomniana, solanka z obszarów górniczych, która obecnie jest wpuszczana bezpośrednio do rzek. Coraz lepsze rozpoznanie fizycznego, chemicznego i biologicznego stanu środowiska podziemnego i struktury naturalnych zbiorników oraz uszczelnień na dużych głębokościach sprawia, że są one w coraz większym stopniu wykorzystywane do bezpiecznego składowania substancji szkodliwych na powierzchni. Osobnym, obszernym zadaniem będzie monitoring miejsc składowania metodami geofizycznymi, a zwłaszcza za pomocą sejsmologii i powtarzalnych zdjęć sejsmicznych, rejestrujących rozprzestrzenianie się chmurowej zatłoczonej substancji.

## MAGAZYNOWANIE ENERGII

Zastępowanie surowców kopalnych OZE powoduje nieprzewidywalną zmienność produkcji energii elektrycznej, wzmaganą dodatkowo przez coraz większą zmienność zjawisk atmosferycznych. W takich warunkach wzrost udziału źródeł odnawialnych w miksie energetycznym wymaga równoległej rozbudowy potencjału do magazynowania energii. Możliwości magazynowania oraz tempo ich zwiększania powinny być duże i odpowiadać ambicjom związanym z rozwojem nieemisyjnej energetyki. Ze względu na ogromną i szybko wzrastającą rozmaitość koncepcji magazynowania energii odnajdujemy się jedynie do tych, w których zastosowaniu widzimy znaczny potencjał i udział badań geofizycznych. Polska może



- ❑ Magazynowanie paliw w kawernach solnych
- ❑ Magazynowanie nośników energii w przestrzeni porowej i szczelinowej
- ❑ Wykorzystanie likwidowanych kopalń do budowy elektrowni szczytowo-pompowych

magazynować 3,2 mld m<sup>3</sup> gazu ziemnego, podczas gdy jego roczne zużycie wynosi 20 mld m<sup>3</sup>. Zgodnie z ustawą o zapasach, gdyby dostawy ropy naftowej ze wszystkich źródeł zostały wstrzymane, to jej zapasy powinny wystarczyć na co najmniej 90 dni, a wystarczają na połowę tego okresu.

Liczymy, że w ciągu najbliższych 15–20 lat technologia rozwine się w taki sposób, że będziemy mogli, np. w procesie elektrolizy z odnawialnych źródeł energii, wytwarzać wodór, biometan czy inne paliwa alternatywne, które można traktować jako praktyczne nośniki energii.

Ze względu na nieprzepuszczalność soli kamiennej wypłukiwane w niej kawerny są cenionymi miejscami magazynowania dużych ilości nośników energii. Obecnie w Polsce paliwami tymi są głównie węglowodory, ale poważnie jest rozważana możliwość magazynowania w najbliższej przyszłości wodoru lub sprężonego powietrza. Obecnie wiele firm naftowych inwestuje w rozwój technologii wodorowych (w tym w magazynowanie wodoru), które wydają się najbardziej obiecującą gałęzią przyszłego sektora energetycznego. Wodór jest jednak bardzo mobilnym gazem, który przedostawszy się do atmosfery, prowadzi do wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych, takich jak para wodna, metan i ozon, dlatego jako naturalne, duże zbiorniki wodoru są rozpatrywane głównie warstwy soli kamiennej.

Pokłady soli i jej wysady występują pod przeszło połową terytorium Polski, toteż ich wykorzystanie może być bardzo rozpowszechnione. Szczególne znaczenie mają wysady solne, w których miąższość soli osiąga tysiące metrów, a jej strop znajduje się blisko powierzchni ziemi. W wielu miejscach również miąższość soli pokładowej jest wystarczająca do utworzenia kawern magazynowych. Jednak w niektórych rejonach kraju sól występuje na głębokości kilku kilometrów i wykorzystanie kawern nie jest tam możliwe ze względu na ich szybkie zapęływanie, nasilające się wraz ze wzrostem temperatury. Stąd konieczność tworzenia precyzyjnych modeli geomechanicznych, z uwzględnieniem stanu termicznego ośrodka skalnego. Obecnie są analizowane możliwości składowania nośników energii na Pomorzu – w pobliżu miejsc odbioru gazu LNG. Ze względu na występowanie w tym regionie grzbietów anhydrytowych redukujących miąższość soli poniżej wymaganej dla kawern, konieczne jest precyzyjne rozpoznanie struktury zdjęciami sejsmicznymi 3D.

Podstawą bezpiecznej lokalizacji kawern w wysadach jest dokładne określenie zasięgu struktur solnych. Zaprojektowanie kawerny zbyt blisko zewnętrznej granicy wysadu stwarza bowiem zagrożenie, że ściany kawerny będą ekspozowane na agresywne oddziaływanie słodkich wód. W celu zobrazowania pionowych lub przewieszonych ścian wysadów są pozyskiwane zdjęcia sejsmiczne. Jednak nie nadają się one równie dobrze do rozpoznawania wewnętrznych struktur wysadu. Kluczowe znaczenie dla projek-

towania kawern w solach będzie zatem miało udoskonalenie geofizycznych metod obrazowania tej struktury z powierzchni ziemi, jak i pomiędzy otworami wiertniczymi.

Ze względu na ograniczoną objętość użytecznych fragmentów wysadów konieczna jest optymalizacja rozmieszczenia i wielkości kawern solnych tak, aby pełzanie soli podczas eksploatacji kawern nie wpływało negatywnie na ich stabilność. Podstawą projektowania kawern jest zatem wariantowe modelowanie mechaniczne ich eksploatacji, polegające na określeniu litologii i właściwości mechanicznych poszczególnych ewaporatów z uwzględnieniem funkcji pełzania uwarunkowanego temperaturą i ciśnieniem. Dostarczenie tych parametrów modelowania również jest zadaniem geofizyków.

Magazynowanie w przestrzeni porowej i szczelinowej jest działalnością w dużym stopniu analogiczną do składowania CO<sub>2</sub>. Przewiduje się, że w naturalnych strukturach geologicznych (poza kawernami) będzie magazynowany głównie gaz ziemny. Przykładem takiej instalacji jest największy w Polsce magazyn gazu Wierzchowice (o pojemności >2 mld m<sup>3</sup>), zlokalizowany w wyeksploatowanym złożu gazu ziemnego w spękany wapieniu cechsztyńskim i piaskowcu czerwonego spągowca. Magazyn ten świetnie funkcjonuje dzięki połączeniu kolektora szczelinowego (szybko rozprowadzającego i odbierającego gaz) z pojemnym kolektorem porowym. W jego projektowaniu dużą rolę odegrały tektoniczne i geomechaniczne analizy szczelin, połączone z badaniami współczesnych naprężeń tektonicznych, których wyniki umożliwiły wskazanie optymalnego kierunku technologicznych otworów poziomych. Ilustruje to wagę geofizycznego rozpoznania przestrzeni szczelinowej w projektowaniu obiektów podziemnych. Podstawową rolę w tym zakresie może odegrać sejsmika 3D ukierunkowana na rejestrację poziomej anizotropii prędkości fali i jej amplitudy. Analizy naprężeń polegają na zaawansowanych badaniach parametrów petrofizycznych, w tym geomechanicznych na podstawie geofizyki otworowej.

Jedną z form akumulowania energii, istotną pod względem pojemności, jest budowa elektrowni szczytowo-pompowych. W czasie nadprodukcji energii w sieci w zbiornikach wodnych usytuowanych na wzniesieniach jest gromadzona potencjalna energia wody, wykorzystywana do wytwarzania prądu w okresie jego niedoborów. W Polsce metoda ta jest wykorzystywana w bardzo małym stopniu, między innymi ze względu na brak odpowiednich deniwelacji na przeważnie nizinnych obszarach naszego kraju. W ostatnich latach pojawiła się jednak koncepcja wykorzystania do akumulowania energii zamykanych kopalń. W takim przypadku zbiornik na powierzchni akumulowałby potencjalną energię wody, a wyrobiska kopalniane na głębokości setek metrów odbierałyby wodę napędzającą turbiny. Pierwszą przeszkodą w takich działaniach jest przekonanie administracji rządowej i górniczej, że likwidowane kopalnie nie są kosztownym problemem, a cenną przestrzenią do wykorzystania. Problemem hydrogeologicznym jest dopływ wód głębinowych do wyrobisk po zaprzestaniu ich odwadniania, który ogranicza pojemność wyrobisk przeznaczoną dla wody wykonującej pracę w elektrowni. Dokładne rozpoznanie stref drenażu wód i ich uszczelnienie przed zalanem wyrobisk jest zadaniem o dużym komponentie geofizycznym. Wstrząsy sejsmiczne i przemieszczenia na

uskokach, indukowane wtórnym podniesieniem poziomu wód głębinowych po zamknięciu kopalń, również powinny być przedmiotem badań, gdyż mogą wpłynąć na integralność uszczelnienia wyrobisk, jak również stwarzać zagrożenie dla zabudowań na powierzchni.

### SUROWCE KRYTYCZNE

Górnictwo kruszców w Europie prawie zanikło ze względu na wysokie koszty eksploatacji złóż i negatywne skutki środowiskowe takiej działalności. Zostało ono zastąpione importem z krajów, w których eksploatacja surowców jest tańsza, a jej wpływ na środowisko mniej dostrzegalny. Jednak coraz częściej pojawia się deficyt kluczowych surowców mineralnych, skutkujący gwałtownymi wzrostami ich cen. Konieczny jest zatem powrót do eksploatacji rodzimych złóż i poszukiwania nowych koncentracji kopalin. Z najnowszej listy surowców wytypowanych przez Komisję Unii Europejskiej jako krytyczne w Polsce występują: koncentracje barytu (w tym z fluorytem), fosforytów, galu, germanu, wanału, wolframu, kobaltu i tytanu. Spoza tej listy ciągle ważny będzie węgiel koksujący (przydatny w hutnictwie) i miedź, której zasoby kurczą się na głębokościach akceptowalnych do wydobywania metodą wyrobisk podziemnych. Dlatego rozważa się możliwość eksploatacji otworowej przez ługowanie, co będzie wymagało szczegółowego rozpoznania miejsc akumulacji i kontekstu strukturalnego.

Przedmiotem zainteresowania przemysłu poszukiwawczego są również sole potasowe, stanowiące ważny komponent nawozów sztucznych. Ich przewarstwienia w ewaporatach cechsztynu mają podwyższoną intensywność promieniowania gamma, dzięki czemu można je lokalizować metodami geofizyki otworowej. Ze względu na indywidualną specyfikę poszukiwań poszczególnych minerałów nie będziemy rozwijać tego wątku w aspekcie badań geofizycznych. Przyjąć można, że badania takie będą podstawą sukcesu poszukiwawczego.

### STRUKTURA I STAN FIZYCZNY SKORUPY ZIEMSKIEJ

Rozpoznanie struktury i stanu fizycznego skorupy ziemskiej jest podstawą planowania wszelkich form zagospodarowania głębokiej przestrzeni podziemnej, z których część wskazaliśmy w tym tekście. O ile szczegółowe badania każdego z obiektów muszą być wykonywane indywidualnie, o tyle pewne parametry dla nich istotne można badać tylko w skali regionalnej lub też w czasie przekraczającym możliwości inwestorów. W artykule opisaliśmy przykładowe, utylitarne badania geofizyczne prowadzone w skali regionalnej, które powinny tworzyć tło i warunki brzegowe inwestycji w głębokiej przestrzeni podziemnej.

Ze względu na potrzebę szczegółowego rozpoznania kształtu i pojemności struktur użytkowych, a także ich szczelności, ważne będzie uzyskanie dużej precyzji konwersji czasowo-głębokościowej. W rozpoznaniu zbiorników szczelinowych, jak również w projektowaniu zabiegów szczelinowania hydraulicznego dużą rolę odgrywa analiza anizotropii prędkości i amplitudy propagowania fal sejsmicznych.

Dla zrozumienia kontekstu geodynamicznego dużych obiektów infrastrukturalnych ważne jest także, prócz

badania obejmujących przypowierzchniową część skorupy, rozpoznanie głębokiej struktury Ziemi – skorupy i górnego płaszcza. Najlepszym narzędziem do prowadzenia takich badań jest głęboka sejsmika refrakcyjna i refleksyjna, wykorzystująca sztuczne źródła energii sejsmicznej, jak też sejsmika pasywna, rejestrująca lokalne zjawiska sejsmiczne, a także telesejsmiczne (dalekie) trzęsienia Ziemi.

Rozpoznanie obszaru Polski głęboką sejsmiką refrakcyjną jest relatywnie bardzo dobre, choć pozostało jeszcze wiele problemów do rozwiązania. Znacznie słabsze jest rozpoznanie głęboką sejsmiką refleksyjną, której profile byłyby cenne dla zrozumienia struktury poszczególnych warstw skorupy i dałyby impuls do rozwoju innych metod geofizycznych stosowanych do badania struktury i właściwości skorupy ziemskiej wraz z jej pokrywą osadową. Do znacznego wzbogacenia wiedzy o polskim fragmencie platformy wschodnioeuropejskiej przyczyniły się regionalne profile sejsmiki refleksyjnej, pokrywające ten słabo sejsmicznie rozpoznany obszar, wykonane ostatnio w ramach projektu *PolandSPAN*.

Charakterystyka powierzchniowego strumienia ciepłego i wglębnego rozkładu temperatur jest podstawą wszelkich modeli fizycznych. Analizy takie powinny uwzględniać niestacjonarny profil temperatury po ostatnim zlodowaceniu. Modele termiczne litosfery należy kalibrować wynikami pomiarów, które przeprowadzono w jednorodnych i stabilnych warunkach, zbliżonych do panujących *in situ*. Profile temperatury pomierzone w otworach wiertniczych wymagają starannej kontroli jakości w celu redukcji efektów cyrkulacji płuczki.

Rozpoznanie rozwarstwienia reologicznego litosfery pozwala na określenie tła geomechanicznego obiektów użytkowych. Wyniki sondowań refrakcyjnych i refleksyjnych należy zinterpretować również w kategoriach składu litologicznego warstw skorupy. Wydaje się, że także badanie lateralnej anizotropii prędkości fali sejsmicznej, połączone z modelami materiałowymi (medium efektywnego), ma duży potencjał do scharakteryzowania składu i struktury skorupy ziemskiej.

Analiza pola odkształceń poziomych wymaga zintegrowania wielu metod badawczych. Podstawą są pomiary geodezji satelitarnej, których precyzja jest wystarczająca do uchwycenia odkształceń tektonicznych na mało aktywnym sejsmicznie obszarze Polski. Do takich badań można wykorzystać pomiary wykonywane przez setki permanentnych stacji GNSS, uwzględniając ich niedostateczną stabilizację. Pierwsze wyniki analiz stabilizacji stacji, prowadzone metodami matematycznymi, są obiecujące. Konieczne jest zintegrowanie wyników pomiarów odkształcenia i naprężeń tektonicznych uzyskanych z obserwacji otworowych i sejsmologicznych. Integrację taką można wykonać na modelach numerycznych z uwzględnieniem rozwarstwienia reologicznego skorupy ziemskiej.

Firmy naftowe przy okazji poszukiwania w Polsce niekonwencjonalnych złóż węglowodorów wykonały nowoczesne karotaże i testy otworowe, pozwalające na profilowanie wielkości naprężeń. Niektóre dane umożliwiają uwzględnienie anizotropii właściwości sprężystych i wytrzymałości. Problemem nierozwiązanym pozostaje udział odkształcenia lepkiego w relaksowaniu naprężeń sprężystych w skałach osadowych. Proces ten dobrze rozpoznano w ewaporatach, ale zachodzi on również w innych skałach osadowych.

Funkcje ich pełzania ciągle są w inicjalnym stadium rozpoznania.

Syntezę geodynamiki skorupy ziemskiej i jej warstwy osadowej można przeprowadzić na podstawie modelowania numerycznego. Modele numeryczne rozkładu naprężeń, odkształceń i deformacji uskokowych wymagają zintegrowania odkształceń lepkich, porospężystych i plastycznych. Problemem do rozwiązania jest w takim przypadku znalezienie optymalnego sposobu zdefiniowania początkowego stanu naprężeń. Problem ten można próbować rozwiązać poprzez integrację tempa lepkiej relaksacji z tempem odkształcenia mierzonym geodezyjnie.

Podstawową metodą rozpoznania uskoków i spękań są zdjęcia sejsmiczne 3D, w których interpretacji obserwuje się szybki postęp. Dobrze zaprojektowane zdjęcia sejsmiczne 3D można wykorzystać do oszacowania anizotropii prędkości i amplitudy fali sejsmicznej w poziomie. Metoda ta, stosowana razem z analizą atrybutów sejsmicznych, umożliwi wychwycenie zjawisk pochodnych spękaniami i uskokom o rozmiarach do niedawna uznawanych za subsejsmiczne. To z kolei, w przypadku lateralnej anizotropii uwarunkowanej strukturalnie, pozwala na budowanie ortotropowego modelu mechanicznego. Zintegrowanie analiz strukturalnych oraz współczesnych naprężeń i deformacji otwiera drogę do wskazania struktur o największym potencjale do rychłej reaktywacji.

Podstawą analiz w skali projektowanych obiektów jest rozpoznawanie właściwości petrofizycznych skał (gęstość, porowatość, przepuszczalność, parametry termiczne i mechaniczne) do głębokości kilku kilometrów p.p.t. za pomocą karotaży geofizycznych w otworach wiertniczych. Dziedzina ta gwałtownie rozwijała się w ostatnich latach. Zapuszczane do otworów urządzenia pomiarowe są często laboratoriami wykonującymi w czasie rzeczywistym ciągły profil spektralny, mechaniczny i chemiczny rozwiercanych skał, zastępując tym samym wykonywane wcześniej analizy rdzeni wiertniczych. Ze względu na szerokie spektrum badań geofizycznych w otworach wiertniczych nie będziemy kontynuować tej tematyki, a jedynie podkreślimy ogromną ilość danych do interpretacji i bogactwo metod analitycznych, które dynamicznie się rozwijają.

#### **NOWOCZESNA INTEGRACJA INFORMACJI GEOLOGICZNEJ**

Wraz z rozwojem technologicznym upowszechniają się i tanieją metody badań geofizycznych, wcześniej stosowane sporadycznie. Należą do nich np. geofizyka satelitarna, lotnicza oraz zaawansowane metody wykonywania zdjęć trójwymiarowych, m.in. na morzu. Dzięki powszechnemu zastosowaniu rejestracji cyfrowej powiększają się geofizyczne bazy danych. Wydaje się, że uzyskanie istotnego postępu w rozpoznaniu geofizycznym skorupy ziemskiej będzie uzależnione od coraz ściślejszej integracji baz danych geofizycznych, geologicznych, geodezyjnych, satelitarnych itp. W efekcie konieczna będzie interdyscyplinarna interpretacja zgromadzonych informacji, polegająca m.in. na testowaniu ich wzajemnej spójności.

Do osiągnięcia pożądanego stanu integracji modeli skorupy ziemskiej niezbędne jest interaktywne połączenie baz danych parametrów petrofizycznych, kalibrowanych danymi laboratoryjnymi, geofizyką otworową i profilowaniami sejsmicznymi. Bazy danych parametrów określo-

- ❑ Organizowanie, wypełnianie i udostępnianie baz danych geologicznych, hydrogeologicznych, geofizycznych, geodezyjnych i satelitarnych
- ❑ Kompleksowy model skorupy ziemskiej – integrujący wyniki badań strukturalnych, pól potencjalnych, petrofizycznych i geomechanicznych
- ❑ Rozwój nowoczesnych badań geofizycznych, w tym wykonywanych z powietrza i na wodzie

nych w tak różnych skalach, jak laboratoryjna i sejsmiczna, jeszcze nie powstały, ale powinno się je tworzyć. Proces ten, jak również interpretacja dużych zbiorów danych geofizycznych, często zaszumionych, trzeba będzie poddać analizie z wykorzystaniem nowoczesnych technik komputerowych, w tym z użyciem sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego. Zastosowanie takich metod analizy danych pozwoli na rozprzestrzenienie punktowych danych petrofizycznych na jednorodne jednostki litologiczne i stratygraficzne. Otworzy to drogę do skalowania parametrów petrofizycznych ze skali właściwej pomiarowi w otworach wiertniczych do skali użytecznej w modelach matematycznych. Zasadniczą rolę w tym zakresie odegrają efektywne modele ośrodków skalnych.

W ramach integracji danych wyzwaniem będzie wykonanie modelu skorupy ziemskiej łączącego wyniki modelowania prędkości fal sejsmicznych z litologią, rozwarstwieniem gęstościowym w zróżnicowanym polu termicznym i ciśnieniowym oraz spełniającego warunek równowagi izostaticznej. Model taki powinien być spójny z modelem termicznym, uwzględniającym niestacjonarny, powierzchniowy strumień ciepły i produkcję ciepła radiogenicznego, oraz z modelem rozwarstwienia reologicznego. Model reologiczny natomiast powinien być spójny z modelem naprężeń i odkształceń, kalibrowanym pomiarami otworowymi i geodezji satelitarnej. Dane do takich modeli obszaru Polski już są – pozostaje więc jedynie problem kompetencji i zdolności do interdyscyplinarnej kooperacji pomiędzy zespołami geofizyków i geologów.

Nowoczesne metody akwizycji danych satelitarnych, lotniczych (drony), ze zbiorników wodnych oraz zdjęć geofizycznych 3D sprawiają, że w krótkim czasie można wygenerować ogromne zbiory danych, wymagające przetworzenia i interpretacji z wykorzystaniem zaawansowanych metod matematycznych. W badaniach sejsmicznych istotne jest rozpoznanie przypowierzchniowej strefy niskich prędkości, tłumiącej i opóźniającej sygnał. Wydaje się, że znaczny postęp w tym zakresie można wykonać poprzez opracowanie i udostępnienie baz danych firm geofizycznych wykonujących przemysłowe profilowania, w których znajdują się tysiące wyników pomiarów dotyczących płytkich stref. Warto również udostępnić na potrzeby badawcze bogate zasoby danych z kopalnianych sieci seismologicznych.

#### **SŁOWO KOŃCOWE**

Gwałtowny wzrost liczebności populacji ludzkiej na naszej planecie, stymulowany rozwojem cywilizacyjnym i wykorzystaniem wydajnych źródeł energii zakumulowa-



nych na Ziemi, przyczynił się do powstania zjawisk katastroficznych w postaci zmian klimatycznych i wymierania gatunków roślin i zwierząt. Jest to świadectwem tego, że powierzchnia Ziemi została przez nas zagospodarowana w stopniu szkodliwym dla jej środowiska naturalnego, jak również zagrażającym egzystencji naszego gatunku. Znajdujemy się obecnie w okresie transformacji paradygmatu energetycznego, tj. rezygnacji z wykorzystywania wysokoemisyjnych i nieodnawialnych, kopalnych źródeł energii na rzecz odnawialnych źródeł niskoemisyjnych. Tempo i skala tych zmian stawiają przed nami nowe wyzwania i zmuszają do zdecydowanych działań. Z tymi wyzwaniami cywilizacyjnymi będziemy się musieli zmierzyć w Polsce w nadchodzących latach. Naszą odpowiedzią powinno być wskazanie nowych źródeł energii – optymalnych dla Polski – oraz sposobów jej akumulacji, a także redukcji emisji gazów cieplarnianych.

Nadmierna eksploatacja powierzchni Ziemi skłania do snucia fantastycznych wizji zasiedlania innych ciał niebieskich. Jednak zanim to uczynimy, powinniśmy lepiej poznać naszą planetę, z jej głębokim wnętrzem, i określić jej zdolność do utrzymania populacji ludzkiej w harmonii z innymi gatunkami. Działania te powinny być wspierane przez równoległy rozwój badań Ziemi, które ze względu na postęp technologiczny w coraz większym stopniu opierają się na wynikach pracy geofizyków.

Nowoczesne badania geofizyczne mają największy potencjał do przeprowadzenia w naukach o Ziemi cyfrowej rewolucji i dokonania w nich przełomu z wykorzystaniem sztucznej inteligencji. Niestety, przyrost trudnych wyzwań

badawczych istotnych dla Polski nie idzie w parze z przyrostem liczebności wykształconych kadr geofizyków, jak również z przyrostem świadomości o potrzebie zintensyfikowania badań Ziemi i wzniesienia ich na wyższy poziom integracji. Wręcz przeciwnie, wygaszanie niektórych form tradycyjnego wykorzystania geofizyki jest kojarzone, niesłusznie, ze schyłkiem badań geofizycznych, co z kolei przekłada się na brak zainteresowania studentów tą dziedziną studiów i w efekcie brak odpowiednio wykształconych geofizyków. Czas najwyższy odwrócić ten niekorzystny trend, zanim zabraknie kadr akademickich w tej dziedzinie. Aby to uczynić, potrzebne jest uświadomienie sobie, jak wielkie wyzwania cywilizacyjne stoją przed geofizykami i w jak wielu dziedzinach gospodarki ich udział będzie niezbędny, by bezpiecznie rozwijać nowe formy gospodarowania przestrzenią podziemną.

W artykule wskazaliśmy niektóre dziedziny utylitarnych badań geofizycznych, stowarzyszonych z szeroko pojętą transformacją energetyczną. Obserwowany wzrost innowacyjności w dziedzinie generowania i akumulowania energii powinien inspirować kierunki rozwoju edukacji i badań geofizycznych w Polsce. Są to poważne wyzwania dla środowisk akademickich, służby geologicznej i administracji rządowej, które powinny nadać za zmianami cywilizacyjnymi. Uważamy, że nadeszła pora na zaproponowanie konkretnych działań, które odwróciłyby niekorzystne trendy w budowaniu zaplecza badań geofizycznych w Polsce. Liczymy, że tekst ten będzie jednym z impulsów do rozpoczęcia pozytywnych zmian.

Praca wpłynęła do redakcji 25.08.2023 r.  
Akceptowano do druku 28.08.2023 r.