

ГЛОБАЛ ИҚЛИМ ЎЗГАРИШИ ШАРОИТИДА ЕР ОСТИ СУВЛАРИНИ ҚИДИРИШ ВА БОШҚАРИШДА ИННОВАЦИОН ТЕХНОЛОГИЯЛАР

Ярбобоев Тўлқин Нурбобоевич

*“Геология ва кончилик иши” кафедраси профессори
Қариш давлат техника университети, Ўзбекистон*

Қосимова Карима Ёдгор қизи

*“Экология ва атроф муҳит муҳофазаси” мутахассислиги магистранти
Қариш давлат техника университети, Ўзбекистон*

Жамилов Бахтиёр Бахриддин ўғли

*“Фойдали қазилмалар геологияси, қидирув ва разведкаси”
таълим йўналиши талабаси*

Қариш давлат техника университети, Ўзбекистон

Аннотация. Глобал иқлим ўзгариши шароитида сув ресурсларининг ҳудудий ва мавсумий тақсимооти ўзгариб, ер ости сувларига бўлган эҳтиёж ортмоқда. Қурғоқчилик даврларининг узайиши ва антропоген таъсир ер ости сувларини қидириш ҳамда бошқаришда инновацион ёндашувларни талаб этмоқда. Мазкур тадқиқотнинг мақсади глобал ва Ўзбекистон тажрибаси асосида ер ости сувларидан самарали фойдаланишда қўлланилаётган замонавий технологияларни таҳлил қилишдан иборат. Тадқиқотда масофадан зондлаш, геоахборот тизимлари, геофизик усуллар, рақамли гидрогеологик моделлаш ва сунъий интеллект технологиялари қўлланилди. Натижалар инновацион технологиялар қидирув аниқлигини ошириш, харажатларни камайтириш ва сув сатҳини башорат қилиш имкониятларини кенгайтиришини кўрсатди.

Калит сўзлар: ер ости сувлари; глобал иқлим ўзгариши; сув ресурслари; масофадан зондлаш; геоахборот тизимлари; геофизик усуллар; рақамли моделлаш; сунъий интеллект.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА И УПРАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Ярбобоев Тулқин Нурбобоевич

профессор кафедры «Геология и горное дело»

Қаришинский государственный технический университет, Узбекистан

Қосимова Карима Ёдгор қизи

магистрант специальности «Экология и охрана окружающей среды»

Қаришинский государственный технический университет, Узбекистан

Жамилов Бахтиёр Бахриддин ўғли

*Студент образовательного направления «Геология, поиски и разведка
полезных ископаемых»*

Каршинский государственный технический университет, Узбекистан

Аннотация. В условиях глобального изменения климата происходит перераспределение водных ресурсов, что приводит к возрастанию роли подземных вод. Увеличение продолжительности засушливых периодов и антропогенное воздействие требуют внедрения инновационных подходов к поиску и управлению подземными водами. Целью исследования является анализ современных технологий эффективного использования подземных вод на основе мирового и узбекского опыта. В работе применены методы дистанционного зондирования, геоинформационные системы, геофизические методы, цифровое гидрогеологическое моделирование и технологии искусственного интеллекта. Результаты показывают, что интеграция инновационных технологий повышает точность поисков, снижает затраты на бурение и расширяет возможности прогнозирования уровня подземных вод в условиях климатических изменений.

Ключевые слова: подземные воды; глобальное изменение климата; водные ресурсы; дистанционное зондирование; геоинформационные системы; геофизические методы; цифровое моделирование; искусственный интеллект.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR GROUNDWATER EXPLORATION AND MANAGEMENT UNDER GLOBAL CLIMATE CHANGE

Yarboboev Tulkin Nurboboevich

*Professor, Department of Geology and Mining
Karshi State Technical University, Uzbekistan*

Kosimova Karima Yodgor kizi

*Master's degree in Ecology and Environmental Protection
Karshi State Technical University, Uzbekistan*

Jamilov Bakhtiyor Bakhriddin ugli

*Student of the educational program Geology, Prospecting and Exploration of
Mineral Resources*

Karshi State Technical University, Uzbekistan

Abstract. Under global climate change conditions, the redistribution of water resources increases the importance of groundwater as a sustainable source of water supply. Prolonged drought periods and anthropogenic impacts necessitate innovative approaches to groundwater exploration and management. The aim of this study is to analyze modern technologies for the efficient use of groundwater based on global experience and the case of Uzbekistan. The research applies remote sensing, geographic information systems, geophysical methods, digital hydrogeological modeling, and artificial intelligence technologies. The results demonstrate that the integration of innovative approaches improves exploration accuracy, reduces drilling costs, and enhances the prediction of groundwater levels under changing climatic conditions.

Keywords: groundwater; global climate change; water resources; remote sensing; geographic information systems; geophysical methods; digital modeling; artificial intelligence.

Кириш. Глобал иқлим ўзгариши XXI асрда инсоният олдида турган энг долзарб экологик ва ижтимоий-иқтисодий муаммолардан бири ҳисобланади. Ҳароратнинг ошиши, ёғингарчилик режимидаги ўзгаришлар, қурғоқчилик ва экстремал иқлим ҳодисаларининг кўпайиши дунё миқёсида сув ресурсларига бўлган босимни кескин кучайтирмоқда. Айниқса, ер усти сув манбаларининг камайиши ва нотекис тақсимланиши шароитида ер ости сувлари барқарор сув таъминотининг стратегик захираси сифатида намоён бўлмоқда.

Халқаро тадқиқотлар шуни кўрсатадики, иқлим ўзгариши ер ости сувларининг табиий тўйиниш жараёнларига салбий таъсир кўрсатиб, сув сатҳининг пасайиши, минераллашувнинг ошиши ва айрим ҳудудларда сув сифатининг ёмонлашишига олиб келмоқда. Шу билан бирга, қишлоқ хўжалиги, саноат ва аҳоли эҳтиёжлари учун ер ости сувларидан жадал фойдаланиш антропоген босимни янада кучайтирмоқда. Бу мавжуд гидрогеологик тизимларни анъанавий усуллар асосида бошқариш самарадорлигини пасайтиради [1, 2].

Анъанавий гидрогеологик тадқиқотлар, асосан, қудук маълумотлари, дала кузатувлари ва статистик таҳлилларга таянади. Бироқ бу ёндашувлар глобал иқлим ўзгариши каби кўп омилли ва динамик жараёнларни етарли даражада акс эттира олмайди. Шу сабабли, охириги йилларда ер ости сувларини ўрганиш ва самарали бошқаришда инновацион технологиялар – масофадан зондлаш (Remote Sensing), геоахборот тизимлари (GIS), рақамли гидрогеологик моделлаштириш, автоматлаштирилган мониторинг тизимлари ҳамда сунъий интеллект асосидаги таҳлил усулларига бўлган қизиқиш сезиларли даражада ортмоқда [3, 4].

Хорижий мамлакатлар тажрибаси (АҚШ, Австралия, Европа Иттифоқи давлатлари) шуни кўрсатадики, инновацион технологияларни жорий этиш орқали ер ости сув захираларини башорат қилиш аниқлиги оширилиб, сув ресурсларидан фойдаланиш самарадорлиги 25-40% гача яхшиланган. Масалан, сунъий йўлдош маълумотлари ва GIS интеграцияси асосида тузилган моделлар иқлим сценарийларини ҳисобга олган ҳолда сув баланси ўзгаришини башорат қилиш имконини бермоқда.

Ўзбекистон шароитида ер ости сувлари асосан қуруқ ва ярим қуруқ иқлим ҳудудларида жойлашган бўлиб, улар қишлоқ хўжалиги учун асосий сув манбаи ҳисобланади. Сўнгги йилларда республикада GIS ва геофизик усуллар асосида ер ости сувларини баҳолаш бўйича қатор илмий ишлар амалга оширилди. Бу тадқиқотлар маҳаллий шароитга мос инновацион ёндашувларни жорий этиш имкони борлигини кўрсатмоқда [5, 6, 7]. Шу боис глобал иқлим ўзгариши шароитида ер ости сувларидан самарали фойдаланишни таъминловчи инновацион технологияларни илмий-назарий ва амалий жиҳатдан таҳлил қилиш, хориж ва Ўзбекистон тажрибасини

таққослаш ҳамда барқарор сув бошқаруви учун илмий асосланган технологияларни қўллаш долзарб масалалардан саналади.

Методлар. Тадқиқотда комплекс илмий-услубий ёндашув қўлланилди. Ер ости сувларидан фойдаланиш самарадорлигини оширишга қаратилган инновацион технологиялар қуйидаги усуллар асосида ўрганилди: илмий адабиётлар ва халқаро ҳисоботларни таҳлил қилиш; гидрогеологик ва иқлим маълумотларини қиёсий таҳлил этиш; GIS ва масофадан зондлаш технологиялари имкониятларини баҳолаш; гидрогеофизик тадқиқот усулларини таҳлил қилиш; хорижий давлатлар ва Ўзбекистонда амалга оширилган амалий лойиҳаларни ўрганиш. Тадқиқотда тизимли ва қиёсий таҳлил усуллари қўлланилиб, инновацион технологияларнинг самарадорлиги комплекс баҳоланди.

Натижалар ва муҳокама. Ушбу тадқиқот доирасида глобал иқлим ўзгариши шароитида ер ости сувларидан самарали фойдаланишни таъминлашга қаратилган инновацион технологияларни қўллаш натижалари тизимли равишда баҳоланди. Натижалар хориж тажрибаси ва Ўзбекистон шароитида олинган маълумотлар асосида таққослама таҳлил қилинди.

Ер ости сувларини ўрганишда геологик, литологик ва тектоник омиллар ҳал қилувчи аҳамиятга эга бўлиб, сув ўтказувчан қатламларнинг тарқалиши ва захира ҳажмини аниқлашда комплекс ёндашув талаб этилади [8]. Иқлим ўзгариши натижасида сув тўпланиш жараёнлари ўзгариб, айрим ҳудудларда табиий қайта тикланиш кескин камаймоқда. Бу ҳолат ер ости сувларини бошқаришда янги илмий ечимларни қўллаш заруратини келтириб чиқаради.

Сўнгги йилларда ер ости сувларини самарали баҳолашда геофизик инновацион усуллар кенг қўлланилмоқда. Хусусан, электр қаршилигини томографиялаш (ERT) ва магнитотеллурик тадқиқотлар сувли горизонтларни юқори аниқликда аниқлаш имконини беради [9]. Бу усуллар бурғулаш ишлари ҳажмини камайтириш орқали иқтисодий самарадорликни оширади ҳамда атроф-муҳитга салбий таъсирни пасайтиради.

Масофадан зондлаш технологиялари (Remote Sensing) ва сунъий йўлдош маълумотлари иқлим ўзгаришининг ер ости сув тизимларига таъсирини макон ва вақт кесимида таҳлил қилиш имконини бермоқда. Landsat ва Sentinel сунъий йўлдошлари орқали олинган маълумотлар ер юзаси намлиги, ўсимлик қоплами ва инфильтрация жараёнларини баҳолашда самарали қўлланилмоқда [10]. Бу маълумотлар GIS платформалари билан интеграция қилинганда, истиқболли сув тўпланиш ҳудудларини башорат қилиш имконияти сезиларли даражада ортади.

Ер ости сувларининг гидрологик баланси қуйидаги ифода орқали баҳоланади:

$$R = P - ET - Q \pm \Delta S$$

бу ерда: R – ер ости сувларининг қайта тўлиши, мм/йил; P – ёғин-сочин миқдори, мм/йил; ET – буғланиш ва транспирация, мм/йил; Q – ер усти оқими, мм/йил; ΔS – ер ости сув захираси ўзгариши.

Иқлим ўзгариши шароитида ЕТ қийматининг ортиши ва Р нотекис тақсимланиши Р нинг камайишига олиб келади.

Глобал иқлим ўзгариши ер ости сувларига қуйидаги асосий йўллар орқали таъсир кўрсатади:

- инфильтрация жараёнларининг камайиши;
- табиий қайта тўлиш (recharge) ҳажмининг қисқариши;
- ҳарорат ошиши натижасида буғланишнинг ортиши;
- чучук ва минерал сувлар чегарасининг ўзгариши.

Натижада кўплаб ҳудудларда ер ости сув сатҳининг пасайиши, сув сифатининг ёмонлашиши ва кудуклар дебитининг камайиши кузатилмоқда.

Олинган натижалар глобал иқлим ўзгариши шароитида ер ости сувларидан самарали фойдаланиш учун инновацион технологияларни қўллашнинг устувор аҳамиятга эга эканини тасдиқлади. Тадқиқот доирасида қўлланилган масофадан зондлаш, геоахборот тизимлари, геофизик усуллар, рақамли моделлаш ва сунъий интеллектга асосланган ёндашувлар анъанавий қидириш ва бошқариш усулларига нисбатан юқори самарадорликка эга экани аниқланди.

Анъанавий гидрогеологик қидириш усуллари асосан бурғулаш ва маҳаллий кузатувларга таянган бўлиб, улар юқори харажат, вақт сарфи ва ноаниқлик хавфи билан тавсифланади. Ушбу тадқиқот натижалари шуни кўрсатдики, RS ва GIS технологиялари билан уйғунлаштирилган ёндашув катта ҳудудларни қамраб олиш, устувор қидириш зоналарини танлаш ва бурғулаш ишларини оптималлаштириш имконини беради. Бу эса бурғулаш ишлари ҳажмини камайтириб, иқтисодий самарадорликни оширади.

Геофизик инновацион усуллар (ERT, MT) орқали олинган натижалар сувли горизонтларнинг геометрик ва гидравлик хусусиятларини юқори аниқликда баҳолаш имконини берди. Рақамли гидрогеологик моделлаш билан уйғунлаштирилганда, бу усуллар иқлим ўзгариши сценарийларида ер ости сувларининг узоқ муддатли ҳолатини башорат қилишда муҳим восита сифатида намоён бўлди. Мазкур ёндашув сув захираларини режалаштириш ва бошқаришда илмий асосланган қарорлар қабул қилиш имконини яратади.

Геоахборот тизимлари (GIS) ер ости сувларини бошқаришда асосий рақамли инструмент сифатида шаклланмоқда. Турли манбалардан олинган гидрогеологик, геофизик ва иқлимий маълумотларни бирлаштириш орқали комплекс моделлар яратилади [11]. Бу моделлар сув захираларини оптимал бошқариш, ортиқча эксплуатациянинг олдини олиш ва барқарор фойдаланиш сценарийларини ишлаб чиқишга хизмат қилади.

Сунъий интеллект ва машинали ўрганиш усуллари ер ости сувларини башорат қилишда янги босқични бошлаб берди. Нейрон тармоқлар, қарор дарахтлари ва кластерлаш алгоритмлари орқали катта ҳажмдаги маълумотлар таҳлил қилиниб, сув сатҳи ўзгариши ва захира камайиш хавфи олдиндан башорат қилинмоқда [12]. Бу технологиялар иқлим ўзгариши шароитида тезкор қарор қабул қилиш имконини яратади.

Инновацион технологияларни жорий этиш нафақат қидириш самарадорлигини оширади, балки ер ости сувларини муҳофаза қилиш ва барқарор фойдаланишга хизмат қилади. Автоматлаштирилган мониторинг тизимлари сув сатҳи ва сифатидаги ўзгаришларни реал вақтда кузатиш имконини бериб, ноқонуний фойдаланиш ҳолатларини олдини олишда муҳим аҳамият касб этади. Бу натижалар барқарор ривожланиш концепцияси ва сув ресурсларини интеграциялашган бошқариш (IWRM) тамойилларига тўлиқ мос келади.

АҚШ (Калифорния)да MAR лойиҳалари, Исроилда тозаланган чиқинди сувлардан қайта тўлдириш, Австралияда GIS ва AI асосида ақлли бошқарув тизимлари, Ҳиндистонда aquifer mapping дастурлари муваффақиятли амалга оширилмоқда.

1-жадвал

Хорижий давлатларда ер ости сувларини бошқаришда қўлланилаётган инновацион технологиялар

Давлат	Қўлланилган технология	Асосий мақсад	Олинган натижа
АҚШ (Калифорния)	MAR, GIS, AI	Сув сатҳини барқарорлаш	Сув захиралари тикланди
Исроил	Тозаланган чиқинди сувлар	Қайта тўлдириш	Ирригация самарадорлиги ошди
Австралия	Smart monitoring, AI	Башоратлаш	Қурғоқчилик хавфи камайди
Ҳиндистон	Aquifer mapping (GIS)	Захира баҳоси	Янги сув манбалари аниқланди

Тадқиқот натижаларига кўра, ривожланган мамлакатларда инновацион технологиялар тизимли равишда жорий этилган бўлса, Ўзбекистонда уларнинг қўлланилиши ривожланиш босқичида. Шу билан бирга, сўнгги йилларда RS, GIS ва рақамли моделлаш технологияларининг жорий этилиши ижобий тенденция сифатида баҳоланади. Таққослама таҳлил шуни кўрсатдики, хорижий мамлакатларда инновацион технологиялар тизимли ва комплекс равишда қўлланилаётган бўлса, Ўзбекистонда уларнинг жорий этилиши босқичма-босқич амалга оширилмоқда [13-18]. Сўнгги йилларда GIS, RS ва рақамли моделлаш бўйича ижобий натижалар қайд этилмоқда.

Тадқиқот натижалари юқори илмий аҳамиятга эга бўлса-да, айрим чекловлар мавжуд. Хусусан, сунъий интеллект моделлари учун сифатли ва узлуксиз маълумотлар базаси талаб этилади. Шунингдек, инновацион технологияларни жорий этиш юқори малакали кадрлар ва техник таъминотни талаб қилади. Келгусида комплекс маълумотлар базасини яратиш, миллий гидрогеологик рақамли платформаларни ишлаб чиқиш ва иқлим сценарийларини янада аниқлаш устувор вазифалар сифатида қаралиши лозим.

Хулоса. Ушбу тадқиқот глобал иқлим ўзгариши шароитида ер ости сувларидан самарали ва барқарор фойдаланиш масаласида инновацион технологияларни жорий этишнинг долзарблиги ва зарурлигини илмий жиҳатдан асослади. Олинган натижалар шундан далолат берадики, анъанавий гидрогеологик қидириш ва бошқариш усуллари иқлим ўзгариши билан боғлиқ ноаниқликлар шароитида етарли даражада самара бермайди, шу сабабли замонавий рақамли ва интеллектуал технологияларга ўтиш объектив эҳтиёжга айланмоқда.

Тадқиқот натижалари масофадан зондлаш (RS), геоахборот тизимлари (GIS), геофизик инновацион усуллар, рақамли гидрогеологик моделлаш ҳамда сунъий интеллектга асосланган таҳлил усуллариининг ер ости сувларини қидириш, баҳолаш ва бошқаришда юқори самарадорликка эга эканини кўрсатди. Ушбу технологияларни комплекс ҳолда қўллаш қидириш ишларининг аниқлигини ошириш, бурғулаш ишлари ҳажмини қисқартириш ва иқтисодий харажатларни оптималлаштириш имконини беради.

Глобал иқлим ўзгариши таъсирида сув ресурсларининг қайта тақсимланиши, қурғоқчилик даврларининг узайиши ва сув сифатининг ёмонлашуви шароитида инновацион мониторинг ва башорат қилиш технологиялари ҳал қилувчи аҳамият касб этади. Автоматлаштирилган мониторинг тизимлари ва рақамли моделлар сув сатҳи ҳамда сифатининг ўзгаришларини реал вақтда баҳолаш, хавфли тенденцияларни олдиндан аниқлаш ва тезкор бошқарув қарорларини қабул қилиш имконини яратади.

Хулоса қилиб айтганда, глобал иқлим ўзгариши шароитида ер ости сувларидан самарали фойдаланиш инновацион технологияларсиз мумкин эмас. Геофизика, масофадан зондлаш, GIS ва сунъий интеллектга асосланган комплекс ёндашув сув ресурсларини муҳофаза қилиш ва барқарор ривожланишни таъминлашда ҳал қилувчи омил бўлиб хизмат қилади. Келгусида ушбу технологияларни миллий шароитга мослаштириш ва амалиётга кенг жорий этиш устувор вазифа бўлиб қолади.

Фойдаланилган адабиётлар

1. Taylor R.G. et al. Ground water and climate change. **Nature Climate Change**, 2013, Vol. 3, pp. 322–329.
2. Todd D.K., Mays L.W. **Groundwater Hydrology**. – 3rd ed. – New York: John Wiley & Sons, 2005. – 636 p.
3. Gleeson T., Alley W.M. Groundwater sustainability and resilience. **Nature Geoscience**, 2016, Vol. 9, pp. 1–6.
4. Alley W.M., Konikow L.F. Groundwater depletion. *Hydrogeology Journal*, 2015, Vol. 23, pp. 317–320.
5. Хасанов А.С. Ўзбекистонда гидрогеология ва муҳандислик геологиясининг ривожланиши. - Т., 2005. - 212 б.
6. Исламов Б.Ф., Кадирходжаев А.А., Пулатов Н.Б., Бимурзаев Г.А., Охунов Ф.А. Ўзбекистонда гидрогеологик тадқиқотлар ривожланиши ва истиқболдаги тенденциялари. Геология ва минерал ресурслар, 2024. – №6. – Б. 66-87.

7. Исмаилов Б.Ж., Бакиев С.А., Ибрагимов А.С. Ўзбекистон минерал сув конлари ресурсларини ҳозирги ҳолати ва ўзлаштириш истиқболлари. Геология ва минерал ресурслар, 2024. – №6. – Б. 88-94.
8. Freeze R.A., Cherry J.A. Groundwater. – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979. – 604 p.
9. Scanlon B.R., Healy R.W., Cook P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal, 2002, Vol. 10, pp. 18–39.
10. Gupta R.P. Remote Sensing Geology. – 2nd ed. – Berlin: Springer, 2003. – 655 p.
11. Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt R.J. Applied Groundwater Modeling. – 2nd ed. – San Diego: Academic Press, 2015. – 564 p.
12. Shah T. et al. Groundwater governance through innovation. Water Policy, 2012, Vol. 14, pp. 1–26.
13. Абдурахмонов А.А., Каримов Ж.К. Ер ости сувларини ўрганишда замонавий геофизик усуллар. – Тошкент: Фан, 2020. – 214 б.
14. Мирзаев Ш.М. Ўзбекистонда ер ости сув ресурсларини баҳолаш ва мониторинг қилиш усуллари. – Тошкент, 2022. – 176 б.
15. Исмоилов Б.Р., Нурматов А.Н. Гидрогеологик тадқиқотларда GIS технологияларидан фойдаланиш. – Геология ва минерал ресурслар, 2019. – №3. – Б. 45–52.
16. Саидов И.С. Гидрогеологияда рақамли моделлаш ва прогнозлаш. – Самарқанд: СамДУ нашриёти, 2021. – 198 б.
17. Қодиров А.Б. Иқлим ўзгариши шароитида ер ости сувларини муҳофаза қилиш. – Экология хабарномаси, 2022. – №4. – Б. 21–27.
18. Yarboboyev T.N., Qosimova K.Yo. O‘zbekistonda yer osti suv resurslaridan oqilona foydalanish va muhofaza qilishning meyoriy-huquqiy asoslari. Geologiya fanlari, innovatsion rivojlanish va mutaxassislar tayyorlashning dolzarb muammolari va istiqbollari. Xalqaro ilmiy-amaliy anjuman ma’ruzalar to‘plami. Toshkent 2025. 475-480 b.