——— ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ **————**

УЛК 532.546

ПРИЗНАКИ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИНТРУЗИИ МОРСКОЙ ВОДЫ В ПРИБРЕЖНЫЕ ВОДОНОСНЫЕ ГОРИЗОНТЫ (НА ПРИМЕРЕ ЧЕРНОГО МОРЯ)

© 2022 г. С. Г. Миронюк^{1,*}, О. А. Хлебникова^{1,**}

¹ Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия *E-mail: mironyuksg@gmail.com

**E-mail: oxana.khlebnikova@gmail.com Поступила в редакцию 17.01.2022 г. После доработки 06.03.2022 г. Принята к публикации 14.04.2022 г.

Рассматриваются признаки интрузии морских вод в водоносные горизонты побережья Черного моря. Обзор литературных источников показал, что этот опасный гидрогеологический процесс формируется под действием природных и антропогенных факторов и имеет практически глобальный характер в связи с повышением уровня Мирового океана и усилением урбанизации приморских территорий. Указаны локальные геоморфологические, геологические и гидрологические факторы, оказывающие решающее влияние на развитие интрузии. Обозначены наиболее уязвимые в отношении развития интрузии участки побережья морей. Описаны негативные последствия внедрения морских вод в водоносные горизонты сущи (усиление коррозии, ухудшение качества подземных вод, деградация прибрежных экосистем и др.). На основе обобщения материалов инженерно-геологических изысканий, выполненных на девяти участках береговых примыканий трубопроводов, приведены данные иллюстрирующие признаки и масштабы внедрения морских вод в отдельные прибрежные районы черноморского побережья. Основные методы изучения гидрогеологической обстановки на участках изысканий: буровые работы, анализ гидрогеологического разреза, лабораторные исследования состава подземных вод, малоглубинные электроразведочные методы (вертикальное электрическое зондирование, электротомография, симметричное электропрофилирование) и др. Основным признаком, указывающим на внедрение морских вод в прибрежные водоносные горизонты, принят уровень солености грунтовых вод и вод первых от поверхности напорных водоносных горизонтов. Наибольшие масштабы интрузии морских вод зафиксированы на участках, сложенных в верхней части геологического разреза дисперсными сильноводопроницаемыми песчаными, гравийно-галечниковыми отложениями или сильнотрешиноватыми породами.

Ключевые слова: Черное море, береговые примыкания трубопроводов, пляжевая зона, интрузия морской воды, коррозия, водоносный горизонт, электротомография

DOI: 10.31857/S0869780922030067

ВВЕДЕНИЕ

Интрузия (внедрение) морских (океанических) вод в прибрежные водоносные горизонты и водные объекты суши — сложный по механизму процесс, формирующийся под действием природных и антропогенных факторов. Этот процесс достаточно хорошо изучен как в естественных, так и в нарушенных условиях [35]. Под интрузией, по определению Р.Д. Де Уист [8], понимают "внедрение клина соленых морских вод в прибрежные напорные или безнапорные водоносные горизонты". Гидродинамическая сущность движения клина морской воды в сторону суши заключается в совместном движении пресных и со-

леных вод, различающихся плотностью и другими физическими характеристиками. В естественных условиях факторами возникновения интрузии являются приливы, штормовые нагоны, сейши, морская трансгрессия и др. Совпадение неблагоприятных факторов на каком-либо участке побережья, например, сизигийного прилива, крупной сейши и длительного штормового нагона может привести к катастрофическому подъему уровня моря и затоплению низменных территорий побережья с последующей инфильтрацией морской воды через зону аэрации в водоносные пласты.

Практически во всех странах, обладающих протяженными урбанизированными побережья-

ми, предотвращение затопления территорий, интрузии морских вод, абразии берегов, оползней и других неблагоприятных процессов стало особенно актуальной проблемой в последние десятилетия [4, 10, 17, 20, 24, 32, 36], что не в последнюю очередь связано с планетарной трансгрессией Мирового океана. Не являются исключением в этом отношении и государства, имеющие выход к внутриконтинентальному полузамкнутому Черному морю [27, 29]. В указанном водоеме, согласно данным спутниковой альтиметрии и мареографов, уровень моря в период с 1993 по 2017 гг. повышался в среднем на 2.5 ± 0.5 мм/год [26], что согласуется с оценками глобального повышения среднего уровня Мирового океана [30]. С учетом средней скорости подъема уровня Мирового океана прогнозируется, что к 2100 г. по наиболее пессимистическому сценарию его уровень может подняться на 52-98 см [31]. Уровень Черного моря за последние 50-60 лет повысился на величину ~15 см. При сохранении указанной выше скорости подъема уровня моря он возрастет к 2050 г. приблизительно "еще на такую же величину" [5]. Прогнозируемый подъем уровня моря является серьезной угрозой для рекреационной инфраструктуры и прибрежных экосистем России, Украины, Румынии, Грузии, Турции и Болгарии. Отмечается, что наибольшую опасность представляют береговая абразия и вторжение соленой воды в прибрежные водоносные горизонты [27]. В России интрузия прослеживаетя преимущественно в низинных прибрежных районах Балтийского, Черного, Азовского, Каспийского, дальневосточных морей [4, 15, 21, 34].

В частности, в Черном море в период активизации штормовых процессов в пределах Имеретинской низменности наблюдалась интрузия морских вод на расстояние до 200 м вглубь суши [1]. Аналогичные явления при штормовых нагонах отмечаются в районе г. Сочи, в Черноморском и частично Раздольненского районов Крыма. Превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) по минерализации, хлоридам и жесткости в некоторых скважинах на территории г. Севастополь [20], береговой зоны полуостровов Малый и Большой Утриш [12] также могут быть связаны с интрузией морских вод. Ряд природных и антропогенных факторов обусловили внедрение морских вод в подземные воды Пицундской низменности (Республика Абхазия) [7]. Согласно многочисленным наблюдениям, интрузии подвержены, как правило, грунтовые воды и первые от поверхности напорные водоносные горизонты.

Интрузия морской воды в соответствии с "Общей классификацией опасных природных процессов и явлений" отнесена к группе медленно развивающихся "прогрессирующих" процессов, часто влекущих экологические последствия [22]. К таковым, прежде всего, относятся засоление

почв и угнетение почвенной фауны, деградация прибрежных лесов (в аридном климате — гибель фреатофитов), водно-болотных угодий, сокращение биоразнообразия стигофауны и др. [37].

Негативные последствия интрузии проявляются также в ухудшении качества питьевых вод (их засолении), сельскохозяйственных земель, в повышении агрессивности грунтовых вод и коррозионной активности грунтов по отношению к металлу и бетону заглубленных частей зданий и сооружений, коммуникаций [11] и др.

На основе исследований особенностей устьевых областей рек выявлено, что в качестве ведущего показателя проникновения морских вод в устья (эстуарии) рек может служить полоса перехода хлоридно-натриевых вод моря в карбонатные (гидрокарбонатные) пресные речные воды, соленость которых не превышает 1%. Полоса перехода — это узкая зона вод с минерализацией от 0.5 до 1.5% [23]. Ситуация признается опасной при превышении соленостью воды показателя в 1%, особо опасной — в 2.5—3% [13].

В данной статье в качестве основной исследовательской задачи авторами была определена попытка оценить признаки и масштабы внедрения морских вод в отдельные прибрежные районы черноморского побережья Кавказа в полосе от Имеретинской низменности до п-ва Абрау, а также в районе г. Варна (Болгария).

Для решения этой задачи были обобщены литературные сведения, систематизированы и проанализированы материалы инженерно-геологических изысканий, выполненные рядом организаций в 1998–2013 гг. при проектировании и строительстве газопроводов на участках береговых примыканий (их вариантов) газопроводов Голубой поток, Джубга-Лазаревское-Сочи и Южный поток. Всего были изучены гидрогеологические условия на территории девяти участков береговых примыканий (названия даны по ближайшему населенному пункту): Константиновский (Имеретинская низменность), Кудепста, Туапсе (Скала Киселева), Якорная Щель, Новомихайловский, Джубга, Архипо-Осиповка, Сукко, Варна (Паша Дере).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные данные, собранные и изученные для решения главной задачи исследований:

- 1. Материалы буровых работ, выполненных по профилям перпендикулярных береговой линии. Как правило, участок буровых работ включал пляж, собственно берег и нижнюю часть приморского склона с древними морскими террасами.
- 2. Материалы гидрогеологических наблюдений при бурении скважин.

- 3. Результаты лабораторных исследований состава подземных вод в соответствии с требованиями ГОСТ $9.602-2005^1$ и СНиП $2.03.11-85^2$.
- 4. Данные наземных и скважинных электромагнитных исследований³.

Малоглубинные электроразведочные методы, как показал опыт, являются наиболее эффективными полевыми методами исследования интрузии, в том числе для приближенной оценки пространственного распространения интрузии в прибрежные водоносные горизонты от уреза воды и распределения пресной, солоноватой и соленой вод [19, 25, 28, 33, 37]. Установлены следующие диапазоны значений удельного электрического сопротивления (УЭС) подземных вод: для зоны пресных вод от 25 до 100 Ом м, для солоноватых — от 5 до 25 Ом·м и для соленых — от 1 до 5 Ом м [19]. Основным признаком, указывающим на проникновения морских вод в береговые массивы, был принят уровень солености грунтовых вод, который определялся, в основном, методом сопротивлений (МС). В ходе инженерно-геологических изысканий организациями, выполнявшими электроразведочные работы (ООО "Питер Газ", ООО "Северо-Запад", ООО ПНКЦ "Инж-Гео", ООО "Велко", ООО "НПЦ Геотех"), применялись следующие разновидности МС:

- 1. Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ). Исследования методом ВЭЗ проводились с помощью 4-электродной симметричной установкой Шлюмберже AMNB с максимальным разносом питающей линии AB/2 до 100 м (шаг измерений составлял 10 м) и комбинированной 3-электродной AMN+MNB. Зондирования 3-электродной установкой отличаются повышенной чувствительностью к наклонным пластам и другим изменениям геологического разреза в горизонтальном направлении. 4-электродная установка применялась в случае невозможности применения удаленного электрода ("бесконечности") в силу орографических или иных причин.
- 2. Симметричное электропрофилирование (СЭП). СЭП выполнялось установкой AMNB с разносами питающей линии AB = 10 и 40 м с шагом по линии профиля 10 м. Такая методика заме-

ров позволяет проследить изменение литологии в интервалах глубин $2-3\,\mathrm{m}$ и $7-10\,\mathrm{m}$ соответственно

- 3. Электротомография (ЭТ). ЭТ основной метод при изучении интрузии, приоритетный по отношению к другим методам для определения минерализации подземных вод и засоленности дисперсных пород. Метод дает более надежные результаты по сравнению с другими методами при изучении геоэлектрических разрезов, значительно отличающихся от горизонтально-слоистых [2], каковыми и является большинство разрезов береговой зоны черноморского побережья Кавказа. На участках береговых примыканий ЭТ проводилась ООО "НПЦ Геотех" с применением одноканальной аппаратуры "ЭРП-1" с коммутированием приемных электродов с использованием коммутатора "СОМх64" (МГУ имени М.В. Ломоносова). В качестве приемной линии использовалась 64 канальная коса, к которой подключались электроды. Длина одной расстановки 189 м. Расстояние между электродами составляло 3 м, что позволяло использовать сетку разносов от 4.5 до 120 м с линейным шагом по разносам. Глубинность исследований достигала 50 м. ООО "Питер Газ" применялась аппаратура "SYSCAL Pro Switch-48", которая позволила проводить измерения одновременно для 10 диполей, что существенно повысило скорость измерений (до 100 измерений в минуту). Аппаратура "SYSCAL Pro Switch-48" дала возможность использовать при работе электроразведочные косы на 48 электродов с шагом 5 и 10 м. Максимальная глубина исследований при этом составляла приблизительно 70 и 110 м соответственно. Использовалось несколько электроразведочных установок: комбинированная 3-электродная и 4-электродная установки Шлюмберже, дипольная осевая установка (максимальный разнос ОО'/2 = 80 м и OO'/2 = 160 м). Обработка электротомографических данных выполнялась в следующей последовательности: 1) загрузка результатов измерений в персональный компьютер с помощью программы Prosys (Iris Instruments), 2) обработка данных ЭТ в программе х2ірі (МГУ имени М.В. Ломоносова), 3) для инверсии данных ЭТ использовалась программа "Res2dinv" версия 3.58.16 (Geotomo Software, Малайзия). Комбинирование различных установок позволило добиться наилучших результатов соотношения глубинности и детальности ЭТ исследований.
- 4. Электрокаротаж-каротаж сопротивления (КС). Электрический каротаж скважин выполнялся в обводненной части разреза двумя зондами: потенциал- и градиент-зондом. Измерения проводились в точечном режиме, через каждые 10 см, в режиме поднятия каротажного зонда. Каротаж проводился с использованием электроразведочной аппаратуры "ЭРП-1" с точечной реги-

¹ ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2006. 59 с. https://docs.cntd.ru/document/1200042293/titles

² СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии. М.: ФГУП ЦПП, 2006. 56 с. https://docs.cntd.ru/document/871001005

³ СП 11-105-97. Свод правил инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства геофизических исследований. Госстрой России. М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 2004. 50 с. https://docs.cntd.ru/document/1200037607



Рис. 1. Обзорная карта района работ с положением участков береговых примыканий трубопроводов (их вариантов): 1 — Константиновский (Имеретинская низменность); 2 — Кудепста; 3 — Туапсе (Скала Киселева); 4 — Якорная Щель; 5 — Новомихайловский; 6 — Джубга; 7 — Архипо-Осиповка; 8 — Сукко; 9 — Варна (Паша Дере).

страцией показаний. Расстояние меду электродами на зонде: для потенциал-зонда — N0.95M0.1A, для градиент-зонда — $A0.95M0.1N^4$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно [3], на Черноморском побережье Кавказа на участке от Анапы до Сочи в отложениях нижнего мела распространены воды хлориднонатриевого типа, а в четвертичных — хлоридные натриево-магниевые, пресные и с повышенной минерализацией. Инженерно-геологические изыскания, выполненные на территории указанных девяти участков береговых примыканий (рис. 1), показали следующее.

Константиновский (Имеретинская низменность). Согласно материалам инженерно-геологических изысканий, низменность представляет собой поверхность новочерноморской и нимфейской аккумулятивных террас, сочленяющихся в устьях рек с одновозрастными речными террасами. Поверхность ее приподнята над уровнем моря на 0.5—4.0 м. Центральная часть низменности

имеет абс. отметки ниже уровня моря. Мощность голоценовых отложений колеблется в пределах 60-100 м. Надводная часть берегового примыкания расположена в пределах пляжа и нимфейской террасы (mQIV nf). Терраса сложена гравийно-галечниковыми отложениями с прослоями песка, с поверхности в ряде мест прослеживаются суглинки. Пляж полного профиля, прислоненный, шириной 35-40 м сложен галечниковыми и гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем, реже песками, перекрытыми галечниковым грунтом. В соответствии с гидрогеологическим районированием в пределах Имеретинской долины выделено несколько водоносных горизонтов в четвертичных и неогенпалеогеновых отложениях [6]. На примыкающей к морю территории распространен первый от поверхности ундалювиальный голоценовый (основной) водоносный горизонт. Глубина установившегося уровня воды в скважинах 0.0-3.9 м. Химический состав подземных вод различный: хлоридный, гидрокарбонатный, гидрокарбонатнохлоридный, хлоридно-гидрокарбонатный. Водовмещающими отложениями являются пески с галькой и гравием. Питание грунтовых вод смешанное: за счет инфильтрации пресных вод из русел рек и за счет внедрения морских вод, особенно во время сильных штормов (минерализация

⁴ РСН 75—90. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Каротажные методы. Госстрой РСФСР. М.: МосЦТИСИЗ. 1990. 75 c. https://docs.cntd.ru/document/1200003363

вод Черного моря в районе исследований составляет 18.0 г/л). На соленых водах часто формируются плавающие линзы пресных и солоноватых вод. Наиболее интенсивное проявление интрузии отмечается в районе м. Константиновский. Здесь вторжение морских вод прослеживается на расстояние до 200 м от береговой линии. Минерализация преимущественно хлоридных вод в зоне интрузии достигает 3.3 г/л, а за ее пределами распространены пресные гидрокарбонатные кальциевые воды с минерализацией 0.24—0.41 г/л.

К континентальным гравийно-галечниковым отложениям приурочен напорный понтический водоносный горизонт (N_{1-2} р). Глубина залегания зеркала горизонта изменяется от 32.0 до 101.5 м. В верхней части горизонта состав подземных вод гидрокарбонатный натриево-кальциевый и гидрокарбонатный натриевый с минерализацией 0.3–1.0 г/л. В нижней части водоносного горизонта тип воды хлоридный натриевый с минерализацией 15.7 г/л.

Кудепста. Береговой участок расположен между поселками Хоста и Кудепста в Хостинском районе г. Сочи (см. рис. 1). В геоморфологическом отношении участок расположен в пределах приморского склона низкогорного (максимальная высота 229 м) Хостинского хребта юго-западной экспозиции, ограниченного полосой абразионно-аккумулятивного пляжа.

Надводная часть пляжа шириной 35—40 м находится под периодическим воздействием штормов, вследствие чего происходит почти полная переработка его поверхности с созданием новых абразионно-аккумулятивных форм микрорельефа. Берег от разрушения штормами защищен волноотбойной стеной высотой до 3 м. Абсолютные отметки этой части территории колеблются от 0.0 до 2.8 м.

Морские накопления мощностью до 4.3 м в пляжевой зоне современной морской террасы представлены гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем до 35%, с включением валунов до 10%. Галька и гравий хорошей степени окатанности.

В процессе изысканий установлено наличие двух водоносных горизонтов:

а) в пляжевой зоне развит водоносный горизонт, приуроченный к гравийно-галечниковым отложениям с линзами песка современной морской террасы. Галечниковые грунты обладают высокими фильтрационными свойствами. Значение коэффициента фильтрации (K_{ϕ}) по данным опытных откачек составляет 34—72 м/сут. Установившийся уровень зафиксирован на глубине 2.4 м (абс. отметки ~0.0 м). По химическому составу подземные воды гидрокарбонатно-хлоридные магниево-натриево-калиевые с минерализацией 3.4—14.5 г/л. Химический состав и высокое

содержание солей в подземных водах этого горизонта указывают на их гидравлическую связь с морскими водами. Влияние морского бассейна на минерализацию подземных вод прослежено на 50 м вглубь суши;

б) к наиболее проницаемым отложениям палеогена и оползневым накоплениям приурочены грунтовые воды трещинно-пластового типа. Этот горизонт вскрыт в интервале 14—51 м. Глубина установившегося уровня изменяется в пределах 1.5—14.1 м. По химическому составу воды описываемого горизонта сульфатно-гидрокарбонатные магниево-кальциевые с минерализацией 0.6—1.5 г/л. Общее направление грунтового потока в сторону моря. В дождливое время года в зоне аэрации возможно образование верховодки.

Туапсе (Скала Киселева). Участок берегового примыкания в районе г. Туапсе приурочен к прибрежно-морской абразионно-аккумулятивной террасе. Пляж на обследованном участке практически отсутствует. Лишь на отдельных небольших вогнутых участках берега отмечаются так называемые "карманные" пляжи прислоненного типа шириной до 7—8 м. Вдоль берега моря простирается абразионный уступ (клиф), сложенный пластами песчаников и слабоокремненных мергелей. Высота и крутизна уступа в точке выхода газопровода составляет 15—30 м и 35°—50° соответственно. На его поверхности активно развиваются осыпи и обвалы.

Гидрогеологический режим по данным изысканий характеризуется наличием одного горизонта подземных вод. Они вскрыты в двух скважинах на глубинах 41.3 и 20.2 м и установились на глубинах 39.0 и 18.5 м соответственно. Водоносный горизонт приурочен к трещиноватой зоне коренных пород терригенно-карбонатного флиша верхнего мела. Подземные воды трещинного типа имеют один гидравлический уровень. Режим подземных вод безнапорный. Разгрузка водоносного горизонта происходит непосредственно в Черное море. По химическому составу подземные воды хлоридно-сульфатно-натриевомагниевые. Общее содержание солей 0.9 г/л. Признаков интрузии морской воды не обнаружено.

Якорная Щель. Участок расположен в пределах хорошо выраженных в рельефе древнеэвксинской, ашейской и шахейской (карангатской) морских террас. Вдоль берега моря развит прислоненный, гравийно-галечный пляж шириной 6—8 м. Четвертичные морские отложения, перекрывющие коренной цоколь террас, представлены галечниками, песками с галькой и гравием, прослоями и линзами глин. Мощность отложений от 1.5 до 6.0 м. Водоносный горизонт спорадического распространения в морских отложениях развит в осадках древнеэвксинской, ашейской

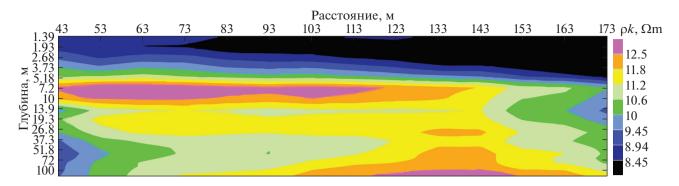


Рис. 2. Участок Новомихайловский. Разрез кажущихся сопротивлений. В левой части рисунка на глубине 40—41 м зона пониженных значений УЭС — признак внедрения морских вод в водоносные горизонты суши.

и шахейской террас. Водовмещающими отложениями являются галечники и пески.

Глубина залегания уровня подземных вод в пределах древнеэвксинской террасы составляет 9.0—18.0 м. Питание подземных вод в основном атмосферное. Грунтовые воды в галечниках и песках ашейской и шахейской террас залегают на глубине от 3.0 до 5.0 м. По химическому составу поземные воды описываемых отложений гидрокарбонатно-кальциевые с минерализацией до 0.4—0.6 г/л. Внедрение морских вод в водоносные горизонты суши не обнаружено.

Новомихайловский. Участок расположен в пределах шахейской (карангатской) средненеоплейстоценовой террасы на отметках 30.0-45.0 м. В границах участка прослеживается протяженный береговой уступ (клиф), высотой до 30.0 м. К уступу примыкают узкий пляж шириной 2-5 м и конус выноса балки Рубцовая щель. Маломощные отложения пляжевой зоны представлены плохо окатанной плоской галькой, гравием (до 15%), глыбами скальных пород размером от 0.5 м и более. Местами на урезе моря на поверхность выходят выветрелые скальные породы. Подземные напорные воды вскрыты на глубине 20.5-40.0 м и установились на глубине 18.0-26.0 м соответственно. Водоносный горизонт распространен в коренных трещиноватых породах терригенно-карбонатного флиша верхнего мела. Подземные воды трещинного типа, их питание происходит за счет фильтрации атмосферных осадков (дождевых, и, отчасти, талых вод). Наблюдается их высачивание в бортах балок и берегового уступа. В свою очередь, в зоне заплеска штормовых волн наблюдается внедрение морской воды в толщу коренных пород (переслаивание мергеля с песчаниками и алевролитами) по трещинам различной природы.

По химическому составу подземные воды сульфатно-хлоридно-натриевые. Общее содержание солей в пробе воды взятой из скважины, расположенной в 310 м от уреза воды в море —

1.6 г/л (солоноватые воды). В нижней части разреза на ПК 40−80 на глубине около 40−41 м фиксируется понижение УЭС до 9−10 Ом·м, что, повидимому, связано с присутствием в разрезе минерализованных вод смешанного происхождения (рис. 2), приуроченных, как следует из геологических материалов, полученных при бурении скважины вблизи бровки клифа, к мергелям глинистым, трешиноватым.

Джубга. Участок расположен в пределах низкогорного эрозионно-денудационного, а в береговой зоне — абразионно-денудационного рельефа. В его геологическом строении, по данным инженерно-геологических изысканий, принимают участие нижне- и верхнемеловые, палеоценовые флишевые и субфлишевые отложения, а также четвертичные образования различного генезиса.

Непосредственно на побережье распространен терригенный флиш нижнего палеоцена (свита цице), представленный переслаиванием песчаников, аргиллитов и мергелей. В разрезе преобладают песчаники и аргиллиты (до 80%). Пляж на участке прислоненный, абразионно-аккумулятивный, шириной 2—5 м. Сложен обломочным материалом, представленным крупной галькой, щебнем и глыбами (более 1 м) песчаника. Мощность отложений составляет 0.5—1.0 м. Повсеместно развит клиф высотой около 7 м, крутизной 50°—60°.

Подземные воды распространены в аллювиальных, аллювиальных, пролювиальных, делювиальных, оползневых и элювиальных отложениях. Глубины залегания уровней подземных вод четвертичных отложений — от 1.5 до 5.0 м. В элювии коренных пород (выветрелые мергели, известняки, песчаники и др.) в районах главных и боковых водоразделов, морских террас на приморском склоне они находятся на глубине более 10 м. По химическому составу подземные воды гидрокарбонатно-кальциевые, натриевые, либо гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевые с минерализацией от 0.1 до 0.8 г/л (пресные). Пита-

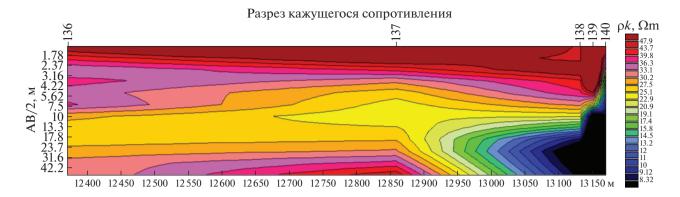


Рис. 3. Разрез кажущегося сопротивления по данным ВЭЗ на участке берегового примыкания Джубга с низкоомным горизонтом в береговой зоне.

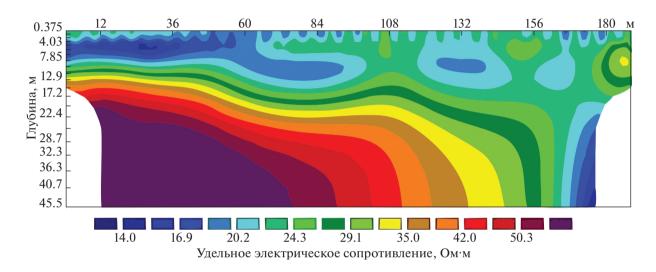


Рис. 4. Электротомографический разрез через зону Тенгинского разлома (фрагмент профиля).

ние подземных вод атмосферное и за счет инфильтрации поверхностных вод из русел рек и балок в водовмещающие отложения. В нижней части склона, на побережье подземные воды солоноватые, их минерализация составляет 11.3— 11.9 г/л, глубина залегания зеркала более 20 м. Водовмешающими отложениями служат малопрочные, выветрелые трещиноватые аргиллиты (полевое описание). Судя по данным ВЭЗ (рис. 3) и химического анализа подземных вод, на участке Джубга имеются признаки проникновения морских вод в горизонт трещинных вод, как и на участке Новомихайловский. Как видно, в правой части рис. 4 на расстоянии около 200 м от уреза воды в море, вглубь суши прослеживается низкоомный горизонт (УЭС = $7-16 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), в целом совпадающий с водоносной зоной трещиноватости.

Такую относительно большую глубину вторжения морских вод в прибрежные водоносные горизонты массивов, сложенных, как правило, породами флишевой формации, можно объяснить их увеличенной проницаемостью в пределах рассматриваемой территории прибрежной зоны Черного моря. Здесь, по данным комплексных геофизических исследований, включающих в себя наземные сейсморазведочные и электроразведочные наблюдения, прослеживается зона повышенной трещиноватости, вероятно, приуроченная к ранее выделенному активному разрыву (Тенгинскому сбросу) [16]. Зона разрыва в правой части рисунка, связанная с обводненными трещиноватыми породами, выделяется значительным понижением электрических сопротивлений на фоне высокоомных ненарушенных блоков пород с УЭС в диапазоне 50—110 Ом·м (см. рис. 4).

Архипо-Осиповка. Участок расположен в пределах поверхности и склонов апшерон-куяльницкой поверхности выравнивания, второй надпойменной террасы и конуса выноса балки Дровяная щель и полосы прислоненного морского пляжа неполного профиля (рис. 5). Абсолютные отметки местности колеблются от 0.0 до 216 м. Берег аб-



Рис. 5. Панорама долины Дровяная щель.

разионного типа характеризуется активным клифом. Во флишевой толще мергели, песчаники, мергели глинистые, известняки глинистые составляют около 90%. На долю песчаников приходится 10%.

Голоценовые осадки представлены аллювиально-пролювиальными отложениями, развитыми вдоль балки Дровяная щель, приуроченной к разрывному нарушению. Чехол пляжевых отложений сложен гравийно-галечными отложениями с включением валунов местных пород. Крупность наносов уменьшается к урезу: в верхней части пляжа, начиная от подошвы клифа, прослеживаются плитчатые глыбы песчаника и известняка, полностью перекрывающие коренные породы. К средней части пляжа крупность материала уменьшается, а его окатанность увеличивается. Вблизи уреза на поверхности лежит средняя и мелкая галька преимущественно плоской формы. Ширина пляжа в центральной части 10–12 м, а по направлению к бортам долины балки уменьшается до 2-3 м.

В гидрогеологическом отношении горная часть участка характеризуется наличием грунтовых вод, приуроченных к трещинной зоне элювия коренных пород (трещинные воды) и четвертичным отложениям. Питание грунтовых вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков. По данным ГУП "Кубаньгеология", грунтовые воды относятся к гидрокарбонатнокальциевому типу (минерализация 0.36–0.6 г/л) [18]. В зоне пляжа на глубинах 3.0–10.0 м были встречены солоноватые трещинные воды. Минерализация их составляет 13.1 г/л. Влияние морского бассейна прослежено до глубины 10.0 м и на 18.0 м вглубь суши. Для расчета возможных водопритоков подземных вод был принят $K_{d} = 1$ 5 м/сут.

Сукко. В геоморфологическом отношении участок берегового примыкания расположен в пределах вдольберегового хребта Семисам и долины р. Шингарь. Высота хребта около 148 м над уровнем моря. Он сложен флишем маастрихтского ярусамеловой системы и терригенным флишем

эоцена и палеоцена палеогеновой системы. Приморский оползневой склон юго-западной экспозиции имеет уклон $40^{\circ}-70^{\circ}$ и более. Склон осложнен крупными трещинами и разрывными нарушениями. Примыкающий к подножью берегового обрыва пляж имеет неполный профиль и ширину 8-10 м.

В пределах мористого склона были встречены нерасчлененные деляпсивные верхнечетвертичные-современные отложения (dlIII-H), слагающие тело скального оползня [14]. Они представлены глыбами мергеля, песчаника и известняка, характеризуются мощностью до 51 м.

Максимальная мощность пляжевых отложений (mH) достигает 1.8 м на гребне штормового вала. В тыловой части пляж сложен крупной галькой и обломками флишевых пород глыбовой размерности, средняя часть сложена, в основном, крупной галькой (60%), а в приурезовой зоне преобладает мелкая галька (50%). В составе пляжевых отложений почти отсутствует гравийная фракция, что свидетельствует об интенсивном выносе мелких фракций с выровненных участков берега и их концентрации в микробухтах.

На участке берегового примыкания выделено два водоносных горизонта. Первый от поверхности водоносный горизонт вскрыт на глубинах 0.8-34.1 м, приурочен к аллювиально-делювиальным песчано-глинистым отложениям (долина р. Шингарь), элювиальным и делювиальным отложениям склонов вдольберегового хребта, трещиноватым коренным отложениям флишевой толщи. Данный водоносный горизонт относится к типу "верховодка" и носит сезонный характер. Питание горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, разгрузка происходит по направлению к р. Шингарь и Черному морю, а также путем инфильтрации в нижележащий основной водоносный горизонт. По химическому составу подземные воды характеризуются в основном как гидрокарбонатные кальциевые. Воды пресные, общая минерализация около 1 г/л.

Ниже по разрезу залегает основной водоносный горизонт, приуроченный к трещиноватым скальным породам. Гидравлически он связан непосредственно с уровнем Черного моря. В районе р. Шингарь основной водоносный горизонт сливается с водами "верховодки". Подземные воды основного водоносного горизонта безнапорные, они распространены повсеместно и вскрыты на глубинах до 132.5 м (его кровля полого наклонена в сторону морского бассейна). Питание водоносного горизонта происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и фильтрационных потерь из речной сети.

В районе бассейна р. Шингарь (область питания) по химическому составу подземные воды ха-

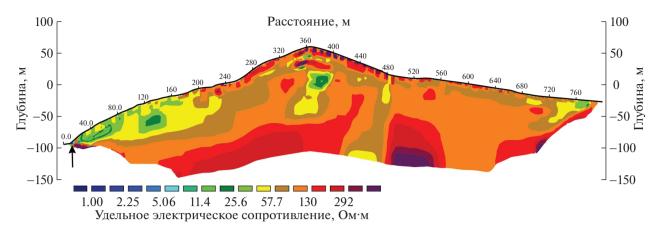


Рис. 6. Электротомографический разрез приморского хребта Семисам (п. Сукко) с зоной интрузии морских вод (стрелка).

рактеризуются как гидрокарбонатные кальциевонатриевые, гидрокарбонатные кальциевые, реже хлоридно-гидрокарбонатные кальциевые, пресные, с общей минерализацией до 1 г/л.

В пляжевой зоне (область смешения морских и пресных подземных вод) воды по химическому составу хлоридные магниево-натриевые, солоноватые, с общей минерализацией до 4.6—13.4 г/л. По данным ЭТ, диапазон УЭС в верхней части водовмещающих пород (трещиноватые мергели, известняки, песчаники) изменяется приблизительно от 3 до 15 Ом·м. Судя по данным электроразведочных работ, внедрение (интрузия) морских вод прослеживается на 5—10 м вглубь суши (рис. 6).

Варна (Паша Дере). Геологическое строение и геоморфологическая обстановка болгарского побережья принципиально отличается от геологического строения и рельефа кавказского побережья РФ. Участок берегового примыкания в районе г. Варна расположен в пределах причерноморского склона Авренского плато с абс. отметками 100—102 м и береговой зоны, которая включает зону пляжа шириной 25—30 м и абразионный уступ высотой 6—8 м с уклоном 35°—40°.

Береговая зона сложена осадками галатской свиты. Они представлены миоценовыми отложениями и характеризуются преобладанием песков и песчаников с отдельными прослоями глин, суглинков, редко конгломератов и известняков мощностью от 50—60 м до 180—200 м [9]. Пески от мелко- до крупнозернистых, преобладают средне- и крупнозернистые разности (рис. 7).

Отложения галатской свиты вскрываются на глубинах от 0.5 до 6 м и более. Перекрываются нерасчлененными элювиально-делювиальными и аллювиальными верхнечетвертичными отложениями (представлены галькой, песками и глиной), либо залегают непосредственно под совре-

менными морскими песчаными отложениями пляжа. Подземные воды в четвертичных отложениях и в осадках галатской свиты гидрокарбонатно-кальшиево-магниевые с минерализацией 0.4— 1.0 г/л. В береговой зоне, в результате интрузии морской воды, состав подземных вод постепенно меняется на гидрокарбонатно-хлоридно-кальциево-натриевый и хлоридно-натриевый. Глубина залегания подземных вод на склоне плато составляет 10.0-28.7 м, а в пляжевой зоне -2.6-2.9 м. Гидростатический уровень воды находится почти на уровне моря. Химические анализы проб воды показали, что грунтовые воды в пределах пляжа по содержанию хлоридов (2.9 г/л) имеют смешанный характер (в морской воде концентрация хлоридов 8.5 г/л).

На всем протяжении профиля ЭТ (рис. 8*a*) выше уровня подземных вод здесь выделяется высокоомный слой песков мощностью около 2.5 м (желтый и коричневый цвет на рисунке) с УЭС 80–150 Ом·м и УЭС 200–400 Ом·м (оранжевый, ярко красный и бордовый цвета на рисунке). Ниже прослеживается низкоомная часть разреза с УЭС песков преимущественно до 10 Ом·м (синий и голубой цвета) вплоть до изученной глубины около 45 м, что свидетельствует о сильной обводненности пород соленой морской водой.

В изученном поперечном разрезе берегового примыкания, как видно на рис. 8δ , также наблюдаются в его восточной части низкоомные участ-



Рис. 7. Песчано-глинистые отложения галатской свиты.

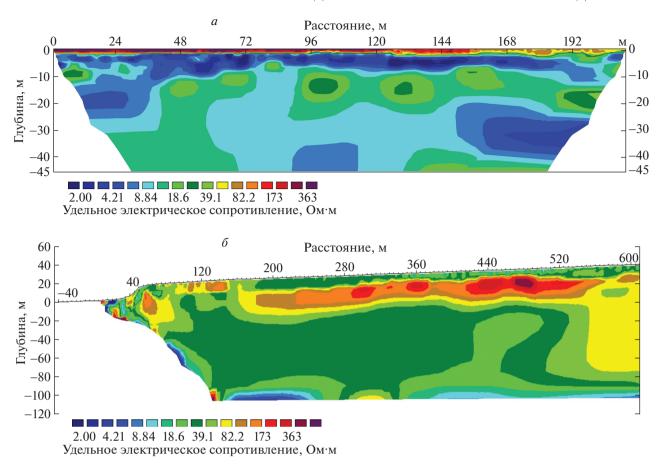


Рис. 8. Электротомографический разрез в пляжевой зоне участка берегового примыкания в районе г. Варны: a — продольный, δ — поперечный.

ки (УЭС до 10 Ом·м) в форме клина ("языка"), что свидетельствует о проникновении морских вод в прибрежную полосу суши и за пределы пляжа.

Наличие низких значений УЭС на глубине 100 м указывает, видимо, о существовании в границах изученного участка протяженного водоносного горизонта с повышенной минерализацией.

выводы

В ходе изысканий на участках береговых примыканий газопроводов были выявлены зоны вторжения морской воды в прибрежные водоносные горизонты. Об этом свидетельствуют данные химического анализа подземных вод и электротомографических исследований. В силу ряда причин (особенности горного рельефа, литология пород береговой зоны, слабое развитие приливоотливных явлений) масштабы этого явления на черноморском побережье невелики.

Наиболее масштабное проявление интрузии отмечено в пределах Имеретинской низменности. Ее развитие здесь определяется сочетанием

геологических и геоморфологических факторов, создающих условия для активного внедрения морских вод в водоносные горизонты суши.

В береговой зоне Западного Кавказа, сложенной преимущественно карбонатно-терригенными породами флишевой формации, повышенная минерализация подземных вод характерна, как правило, для первого от поверхности водоносного горизонта, развитого в крупнообломочных отложениях пляжевой зоны.

Масштабы проникновения (интрузии) морских вод в водоносные горизонты суши увеличиваются на участках развития сильнотрещиноватых пород коренной основы, приуроченных к разрывным нарушениям и низменным участкам побережья, сложенных дисперсными, преимущественно песчаными породами. Наиболее значительные проявления интрузии зафиксированы на побережье Болгарии в районе Варны благодаря присутствию здесь мощной толщи преимущественно песчаных отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Антошкина Е.В. Инженерно-геологические условия Имеретинской низменности // Географические исследования Краснодарского края: сб. науч. тр. Вып. 5. Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2010. С. 42—46.
- 2. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14—17.
- 3. Гидрогеология СССР. Т. 9. Северный Кавказ / Редакторы: Н.А. Григорьев, Н.С. Погорельский М.: Недра, 1968. 488 с.
- 4. *Гольдберг В.М.* Интрузия морских вод в горизонты пресных подземных вод // Гидрологические исследования за рубежом / Под ред. Н.А. Маринова. М.: Недра, 1982. С. 74—88.
- 5. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 210 с.
- Громов В.Е., Пашковский И.С. Геофильтрационная модель Имеретинской низменности для проектирования инженерной защиты территории и олимпийских объектов // Геоэкология. 2009. № 3. С. 214—227.
- 7. Дбар Р.С., Жиба Р.Ю., Ивлиева О.В. Искусственное регулирование приморской гидроэкологической системы полуострова Пицунда // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019. Т. 5 (15). Вып. 1. С. 206—216.
- 8. *Де Уист Р.Д.* Гидрогеология с основами гидрологии суши. Т. 1. М.: Мир, 1965. 312 с.
- 9. Димитров П., Димитров Д., Пейчев В., Цанева М. Физико-географическая и геолого-литологическая характеристика болгарского сектора Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015. № 2. С. 170—176.
- 10. Зекцер И.С. Подземные воды как компонент окружающей среды. М.: Научный мир, 2001. 328 с.
- 11. *Зырянов В.П.*, *Чебанова М.К.*, *Филатов Н.Н*. Интрузия морских вод в устья рек // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 5. С. 492—503.
- 12. *Кухарев И.Л., Шереметьев А.В.* Гидрогеологическое строение // Государственный природный заповедник "Утриш". Атлас. Т. 2. Анапа; Новороссийск: ИП Гуща Е.В., 2013. С. 20—23.
- 13. Магрицкий Д.В. Опасные гидрологические процессы и явления в устьях рек России // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата "ГЕОРИСК 2018": Т. 1. М.: РУДН, 2018. С. 82—87.
- 14. Миронюк С.Г., Ионов В.Ю. Опыт и проблемы оценки устойчивости обвально-оползневых склонов морских побережий (на примере хр. Семисам, Краснодарский край) // Сб. материалов Международного семинара "Опасные для строительства геологические процессы". М.: МИСИ МГСУ, 2019. С. 33–38.
- 15. Михневич Г.С., Кречик В.А., Крек А.В., Данченков А.Р. Взаимодействие морских и подземных вод в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики и его экологические последствия // Водные биоресурсы,

- аквакультура и экология водоемов: матер. VII Междунар. Балтийского морского форума. Калининград, 2019. Т. 3. С. 369—380.
- 16. *Несмеянов С.А.* Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа: (Опережающие исследования для инженерных изысканий). М.: Недра, 1992. 254 с.
- Павловский А.А. Повышение уровня Финского залива в XXI веке: сценарии и последствия. К вопросу о затоплении береговой зоны в пределах Курортного района Санкт-Петербурга // Общество. Среда. Развитие (Тегга Humana). 2010. № 4. С. 219—226.
- 18. Попков В.И., Соловьев В.А., Соловьева Л.П. Геоэкология подводных трубопроводов (на примере черноморского отрезка трассы "Голубой поток") // Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. 2006. № 10 (23). С. 66—75.
- 19. Равиндран А.А. Исследование характеристик приповерхностного водоносного горизонта в береговой зоне с использованием геоэлектрических и геохимических методов в циркониевом комплексе, Пажайякаял (Тутукуди, Индия) // Геология и геофизика. 2013.Т. 54. № 12. С. 1961—1971.
- 20. Расторгуев А.В., Левицкая Е.В. Интрузии морских вод к прибрежным водозаборам // Инновации в геологии, геофизике и географии 2019: матер. 4-й Междунар. научно-практ. конф. М.: Перо, 2019. С. 113—115.
- 21. Семенчук А.В. Условия формирования подземных вод Балтийской косы (Калининградская область): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: СПбГГУ, 2018. 19 с.
- 22. Систематика природных опасностей и чрезвычайных ситуаций [Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Жигалин А.Д., Кузнецов И.В., Куринов М.Б., Писаренко В.Ф., Родкин М.В.] // Природные опасности России. Природные опасности и общество. Т. 1. Гл. 2, М.: Изл-во КРУК, 2002. С. 57—93.
- 23. *Третьяков М.В., Иванов В.В.* Состояние и проблемы развития технологий оценки и прогнозирования интрузии морских вод в устьевые области рек Арктики в условиях регулирования стока и климатических изменений // Тр. Государственного океанографического института. 2013. № 214. С. 200—212.
- Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
- Юровский Ю. Г. Подземные воды шельфа. Задачи и методы изучения. Симферополь: ДиАйПи, 2013. 260 с.
- Avsar N.B., Jin, S., Kutoglu, S.H. Recent sea level changes in the Black sea from satellite gravity and altimeter mesurements // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 2018. XLII–3/W4, 83–85. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-83
- 27. Avsar N.B., Kutoglu S.H., Erol B., Jin S. Coastal risk analysis of the Black Sea under the sea level rise. FIG Working Week 2015 from the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World, Sofia, 17–21 May 2015. https://fig.net/resources/proceedings/fig_pro-

- ceedings/fig2015/papers/ts05a/TS05A_avsar_kuto-glu et al 7725.pdf
- 28. Buquet D., Sirieix C., Anschutz P., Malaurent P., Charbonnier C., et al. Shape of the shallow aquifer at the fresh water-sea water interface on a high-energy sandy beach // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2016. V. 179. P. 79–89. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.08.019
- 29. *Chitea F., Georgescu P., Ioane D.* Geophysical detection of marine intrusions in Black Sea coastal areas (Romania) using VES and ERT data // Geo-Eco-Marina, 2011. № 17. P. 95–102. https://doi.org/10.5281/zenodo.56903
- 30. *Church J.A.*, *White*, *N.J.* Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century // Surv. Geophys. 2011. V. 32. № 4. P. 585–602. https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1
- Church, J. A., et al. Sea Level Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.026.
- 32. Genser E.A. Natural Disasters, Urban Vulnerability, and Risk Management: A Theoretical Overview // In

- The Interplay between Urban Development, Vulnerability, and Risk Management. Springer Briefs in Environment, Security, Development and Peace, 2013. V. 7. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29470-9 2
- 33. Golshan, M., Colombani, N., Mastrocicco, M. Assessing Aquifer Salinization with Multiple Techniques along the Southern Caspian Sea Shore (Iran) // Water (Switzerland). 2018. V. 10. № 4. https://doi.org/10.3390/w10040348
- 34. *Khublaryan M.G., Frolov A.P., Yushmanov I.O.* Seawater intrusion into coastal aquifers // Water Resources. 2008. V. 35. № 3. C. 274–286.
- 35. Park Chan-Hee. Saltwater intrusion in coastal aquifers. Georgia Institute of Technology. ProQuest Dissertations Publishing, 2004. 259 p.
- 36. Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Concepts, Methods and Practices. Bear, J., Cheng, AH-D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera, I. (Eds.) Springer Science+Business Media Dordrecht. 1999. 627 p.
- 37. Werner A.D., Bakker M., Post Vincent E.A., Vandenbohede A., et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges // Advances in Water Resources. V. 51. January 2013. P. 3–26.

SIGNS AND GEOLOGICAL PREREQUISITES OF SEAWATER INTRUSION INTO COASTAL AQUIFERS (THE EXAMPLE OF THE BLACK SEA)

S. G. Mironyuk^{a,#} and O. A. Khlebnikova^{a,##}

^a Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty, Leninskie gory, 1, Moscow, 119991 Russia [#]E-mail: mironyuksg@gmail.com ^{##}E-mail: oxana.khlebnikova@gmail.com

Signs of seawater intrusion into aquifers at the Black Sea coast are considered. Review of publications showed that this dangerous hydrogeological process develops under the influence of natural and anthropogenic factors, being almost global due to rising sea level and growing urbanization of coastal areas. Local geomorphological, geological and hydrological factors that have a decisive influence on the development of intrusion are indicated. The analysis of publications allowed us to outline the most vulnerable seashore areas as regards the intrusion development. Hazardous consequences of sea-water intrusion into land aquifers (intensification of corrosion, deterioration of groundwater quality, degradation of coastal ecosystems, etc.) are described. The data illustrating the signs and scale of sea water intrusion into certain coastal areas of the Black Sea coast are presented. The main methods to study the hydrogeological situation at the survey sites were drillings, analysis of the hydrogeological section, laboratory studies of groundwater composition, shallow electrical survey methods (vertical electrical sounding, electro-tomography, symmetrical electro-profiling), etc. The main feature indicating the intrusion of seawater into the coastal aquifers was taken to be the salinity level of groundwater and water first from the surface of the pressure aquifers. The greatest extent of seawater intrusion was recorded in the areas composed in the upper part of the geological section by dispersed highly permeable sand, gravel and pebble deposits or highly fractured rocks.

Keywords: the Black Sea, pipeline abutment, beach zone, seawater intrusion, corrosion, aquifer, electrotomography

REFERENCES

- Antoshkina, E.V. Inzhenerno-geologicheskie usloviya Imeretinskoi nizmennosti [Engineering geological conditions in the Imereti Lowlands]. Geograficheskie issledovaniya Krasnodarskogo kraya [Geographical studies
- in the Krasnodar krai]. Krasnodar, Kuban State University, 2010, pp. 42–46. (in Russian)
- 2. Bobachev, A.A., Gorbunov, A.A., Modin, I.N., Shevnin, V.A. *Elektrotomografiya metodom soprotivlenii i vyzvannoi polyarizatsii* [Resistance and induced polar-

- isation electrotomography]. *Pribory i sistemy razve-dochnoi geofiziki*, 2006, no. 2, pp. 14–17. (in Russian)
- 3. *Gidrogeologiya SSSR. Tom 9. Severnyy Kavkaz.* [Hydrogeology of the USSR. Vol. 9. North Caucasus]. Grigoriev, N.A., Pogorelskii, N.S., Eds., Mosow, Nedra Publ., 1968, 488 p. (in Russian)
- Gol'dberg, V.M. Intruziya morskikh vod v gorizonty presnykh podzemnykh vod [Intrusion of seawater into fresh groundwater aquifers]. Gidrologicheskiye issledovaniya za rubezhom [Hydrological studies abroad], Marinov, N.A., Ed., Moscow, Nedra Publ., 1982, pp. 74– 88. (in Russian)
- 5. Goryachkin, Yu.N., Ivanov, V.A. *Uroven' Chernogo morya: proshloe, nastoyashchee i budushchee* [The Black Sea level: past, present and future]. Sevastopol, EKO-SI-Gidrofizika Publ., 2006, 210 p. (in Russian)
- Gromov, V.Ye., Pashkovskii, I.S. Geofil'tratsionnaya model' Imeretinskoi nizmennosti dlya proektirovaniya inzhenernoi zashchity territorii i olimpiiskikh ob'ektov [Geofiltration model of the Imereti Lowlands for the design of engineering protection of the area and Olympic venues]. Geoekologiya, 2009, no. 3, pp. 214–227. (in Russian)
- 7. Dbar, R.S., Zhiba, R.Yu., Ivlieva, O.V. *Iskusstvennoe regulirovanie primorskoi gidroekologicheskoi sistemy poluostrova Pitsunda* [Artificial regulation of the coastal hydro-ecological system of the Pitsunda Peninsula]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2019, vol. 5 (15), no. 1, pp. 206–216. (in Russian)
- 8. De Uist, R.D. *Gidrogeologiya s osnovami gidrologii sushi* [Hydrogeology with basic terrestrial hydrology]. Moscow, Mir Publ., 1965, vol. 1, 312 p. (in Russian)
- 9. Dimitrov, P., Dimitrov, D., Peichev, V., Tsaneva, M. Fiziko-geograficheskaya i geologo-litologicheskaya kharakteristika bolgarskogo sektora Chernogo morya [Physico-geographical and geological-lithological characteristics of the Bulgarian sector of the Black Sea]. Geologiya i poleznye iskopayemye Mirovogo okeana, 2015, no. 2, pp. 170–176. (in Russian)
- Zektser, I.S. Podzemnye vody kak komponent okruzhayushchei sredy [Groundwater as a component of the environment]. Moscow, Nauchnyi Mir Publ., 2001, 328 p. (in Russian)
- 11. Zyryanov, V.P., Chebanova, M.K., Filatov, N.N. *Intruziya morskikh vod v ust'ya rek* [Intrusion of seawater into river mouths]. *Vodnye resursy*, 2015, vol. 42, no. 5, pp. 492–503. (in Russian)
- 12. Kukharev, I.L., Sheremet'ev, A.V. *Gidrogeologicheskoe stroenie* [Hydrogeological structure]. *Gosudarstvennyi prirodnyi zapovednik "Utrish"*. *Tom 2. Anapa* [Utrish State Nature Reserve. Vol. 2. Anapa]. Novorossiisk, IP Gushcha E.V. Publ., 2013, pp. 20–23. (in Russian)
- 13. Magritskii, D.V. *Opasnye gidrologicheskie protsessy i yavleniya v ust'yakh rek Rossii* [Hazardous hydrological processes and phenomena in Russian river mouths]. *Analiz, prognoz i upravleniye prirodnymi riskami s uchetom global'nogo izmeneniya klimata "GEORISK 2018"* [Analysis, forecasting and management of natural risks in the context of global climate change "GEORISK 2018"]. Proc. the 10th Int. Sci. and Pract. Conf., vol. 1. Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 82–87. (in Russian)

- Mironyuk, S.G., Ionov V.Yu. Opyt i problemy otsenki ustoichivosti obval'no-opolznevykh sklonov morskikh poberezhii (na primere khr. Semisam, Krasnodarskii krai) [Experience and problems in assessing the stability of rockfall-landslide slopes on seashores (case study of the Semisam Ridge, Krasnodar Krai)]. Proc. Int. Workshop "Geological Processes Hazardous to Construction". Moscow, MISI MGSU Publ., 2019, pp. 33–38. (in Russian)
- 15. Mikhnevich, G.S., Krechik, V.A., Krek, A.V., Danchenkov, A.R. *Vzaimodeistvie morskikh i podzemnykh vod v pribrezhnoi zone Yugo-Vostochnoi Baltiki i ego ekologicheskie posledstviya* [Sea- and groundwater interaction in the coastal zone of the South-Eastern Baltic and its ecological consequences]. *Vodnye bioresursy, akvakul'tura i ekologiya vodoemov* [Aquatic bioresources, aquaculture and ecology of water bodies]. Proc. the VII Intern. Baltic Marine Forum. Kaliningrad, 2019, vol. 3, pp. 369–380. (in Russian)
- Nesmeyanov, S.A. Neostrukturnoe raionirovaniye Severo-Zapadnogo Kavkaza: (Operezhayushchie issledovaniya dlya inzhenernykh izyskaniy) [Neostructural zoning of the North West Caucasus: (Frontier Studies for Engineering Survey)]. Moscow, Nedra Publ., 1992, 254 p. (in Russian)
- 17. Pavlovskii, A.A. *Povyshenie urovnya Finskogo zaliva v XXI veke: stsenarii i posledstviya. K voprosu o zatoplenii beregovoi zony v predelakh Kurortnogo raiona Sankt-Peterburga* [The rising level of the Gulf of Finland in the 21st century: scenarios and consequences. On the issue of coastal flooding within the Kurortny District of St. Petersburg]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana)*, 2010, no. 4, pp. 219–226. (in Russian)
- 18. Popkov, V.I., Solov'ev, V.A., Solov'eva, L.P. Geoekologiya podvodnykh truboprovodov (na primere chernomorskogo otrezka trassy "Goluboi potok") [Geoecology of submarine pipelines (case study of the Black Sea section of the Blue Stream pipeline)]. Yuzhno-rossiiskii vestnik geologii, geografii i global'noi energii, 2006, no. 10 (23), pp. 66–75. (in Russian)
- 19. Ravindran, A.A. *Issledovanie kharakteristik pripoverkh-nostnogo vodonosnogo gorizonta v beregovoi zone s is-pol'zovaniem geoelektricheskikh i geokhimicheskikh metodov v tsirkonievom komplekse, Pazhayyakayal (Tutukudi, Indiya)* [Investigation of the characteristics of the near-surface aquifer in the coastal zone using geoelectrical and geochemical methods in the zirconium complex, Pajayakayal (Tutukudi, India]. *Geologiya i geofizika*, 2013, vol. 54, no. 12, pp. 1961–1971. (in Russian)
- Rastorguev, A.V., Levitskaya, E.V. *Intruzii morskikh vod k pribrezhnym vodozaboram* [Seawater intrusions to coastal water storage facility]. *Innovatsii v geologii, geofizike i geografii*. [Innovations in Geology, Geophysics and Geography]. Proc. the 4th Int. Sci. and Pract. Conf.]. Moscow, Pero Publ., 2019, pp. 113–115. (in Russian)
- 21. Semenchuk, A.V. *Usloviya formirovaniya podzemnykh vod Baltiiskoi kosy (Kaliningradskaya oblast')* [Conditions of formation of underground waters of the Baltic Spit (Kaliningrad region)]. Extended Abstract Cand. Sci. (Geol.-Min.) Diss. St. Petersburg, St. Petersburg State Mining University Publ., 2018, 19 p. (in Russian)

- 22. Sistematika prirodnykh opasnostei i chrezvychainykh situatsii [Systematics of natural hazards and emergency situations]. Prirodnye opasnosti Rossii. Prirodnye opasnosti i obshchestvo [Natural hazards of Russia. Natural hazards and society]. Osipov, V.I., Shoigu, S.K. Eds., Moscow, KRUK Publ., 2002, pp. 57–93. (in Russian)
- 23. Tret'yakov, M.V., Ivanov, V.V. Sostoyanie i problemy razvitiya tekhnologii otsenki i prognozirovaniya intruzii morskikh vod v ust'evye oblasti rek Arktiki v usloviyakh regulirovaniya stoka i klimaticheskikh izmenenii [The state and problems of development of technologies for assessing and predicting the intrusion of marine waters into the estuaries of Arctic rivers under the conditions of flow regulation and climate change]. Trudy Gos. okeanograficheskogo instituta, Moscow, 2013, no. 214, pp. 200–212. (in Russian)
- Shestakov, V.M. Gidrogeodinamika [Hydrogeodynamics]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1995, 368 p. (in Russian)
- Yurovskii, Yu.G. Podzemnye vody shel'fa. Zadachi i metody izucheniya [Underground waters of the shelf. Tasks and methods of study]. Simferopol: DIP Publ., 2013, 260 p. (in Russian).
- Avsar, N.B., Jin, S., Kutoglu, S.H. Recent sea level changes in the Black sea from satellite gravity and altimeter mesurements. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2018, XLII-3/W4, 83–85, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-83-2018
- 27. Avsar, N.B., Kutoglu, S.H., Erol, B., Jin, S. Coastal risk analysis of the Black Sea under the sea level rise. FIG Working Week 2015 from the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World, Sofia, May 17—21, 2015. https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2015/papers/ts05a/TS05A_avsar_kutoglu et al 7725.pdf
- 28. Buquet, D., Sirieix, C., Anschutz, P., Malaurent, P., et al. Shape of the shallow aquifer at the fresh water-sea water interface on a high-energy sandy beach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2016, vol. 179, pp. 79–89. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2015.08.019
- Chitea, F., Georgescu, P., Ioane, D. Geophysical detection of marine intrusions in Black Sea coastal areas (Romania) using VES and ERT data. Geo-Eco-Marina,

- 2011, no. 17/2011, pp. 95–102. https://doi.org/10.5281/zenodo.56903
- Church, J.A., White, N.J. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surv. Geophys.*, 2011, vol. 32, no. 4, pp. 585–602. https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1
- 31. Church, J.A., White, N.J. Sea Level Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, doi:10.1017/CBO9781107415324.026
- 32. Genser, E.A. Natural Disasters, urban vulnerability, and risk management: a theoretical Overview. In: The Interplay between urban development, vulnerability, and risk management. Springer briefs in environment, security, development and peace, 2013, vol. 7, Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29470-9_2
- Golshan, M., Colombani, N., Mastrocicco, M. Assessing aquifer salinization with multiple techniques along the Southern Caspian Sea Shore (Iran). Water (Switzerland), 2018, vol. 10, no. 4. https://doi.org/10.3390/w10040348
- 34. Khublaryan, M.G., Frolov, A.P., Yushmanov, I.O. Seawater intrusion into coastal aquifers. *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 3. pp. 274–286.
- Park, Chan-Hee. Saltwater intrusion in coastal aquifers. Georgia Institute of Technology. ProQuest Dissertations Publ., 2004. 259 p.
- 36. Seawater intrusion in coastal aquifers: concepts, methods and practices. Bear, J., Cheng, AH-D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera, I. (Eds.) Springer Science+Business Media, Dordrecht, 1999, 627 p.
- 37. Werner, A.D., Bakker, M., Post Vincent, E.A., Vandenbohede, A., et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, vol. 51, January 2013, pp. 3–26.