

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РАЙОНАХ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОГО ПРЕДУРАЛЬЯ

Рассмотрены техногенные изменения в подземных водах и геологической среде районов добычи углеводородов в Южном Предуралье. При разработке нефтяных и газовых месторождений неизбежны снижение пластового давления и изменение уровня пластовых вод. Доказана гидродинамическая связь водоносных горизонтов Южного Предуралья. Предложена фильтрационная модель развития депрессионной воронки в районе разрабатываемых месторождений нефти и газа.

Ключевые слова: гидрогеодинамика, сейсмология, Южное Предуралье, техногенные изменения, добыча углеводородов.

Южное Предуралье включает западную и центральную части Оренбургской области до Уральских гор, а также нефтегазоносные юго-западную часть Башкортостана и северо-запад Казахстана. В Южном Предуралье около 40 лет интенсивно эксплуатируются крупнейшее в Европе Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение (ОНГКМ) и множество месторождений нефти. Высокая плотность месторождений и интенсивная их разработка вызывают изменения в геологической среде и подземных водах.

Техногенные изменения в недрах земли обычно протекают замедленно и, как правило, имеют отдаленные последствия и трудно устранимы. При добыче нефти и газа постепенно уменьшается давление в продуктивных пластах и окружающих их водоносных горизонтах. Изменения в гидро- и газодинамике обуславливают соответствующие изменения в геодинамике твердой части земной коры. Последствия техногенных изменений в земной коре могут привести к крупнейшим техногенным катастрофам и чрезвычайным ситуациям: землетрясениям, провалам земной поверхности, изменениям в балансе и качестве подземных вод зоны активного водообмена, являющихся основным источником водных ресурсов для меженного речного стока и водоснабжения.

В связи с этим необходимо прогнозирование развития гидрогеодинамических процессов с учетом техногенного воздействия (влияния добычи УВ-сырья). Это обуславливает необходимость построения модели формирования и развития техногенных изменений в пластовых водах месторождений.

Модель развития гидрогеодинамических процессов должна учитывать геологические и

тектонические особенности строения территории исследования и основываться на выявленных направлениях движения и фильтрации в водоносных комплексах месторождений.

Нижняя граница подземных вод нижнего гидрогеохимического этажа на юго-востоке Восточно-Европейской равнины (географической страны) как природного комплекса располагается в толщах кристаллического фундамента. При анализе геоэкологических условий воздействия добычи углеводородов необходимо ясно и четко представлять строение геологической среды и геодинамические процессы в ней в естественных и техногенно измененных условиях.

Геологическое строение и морфоструктура территории исследований

Район Южного Предуралья представлен типичными платформенными геологическими структурами и имеет длительную и сложную историю геологического развития. Наиболее древние породы кристаллического фундамента архейского возраста: диабазы, порфириды, гранодиориты, гнейсы, сланцы и другие метаморфические образования – имеют возраст 2500–2700±100 млн. лет [1].

По тектоническому районированию территория исследований расположена на юго-востоке Восточно-Европейской платформы на юго-восточном склоне Волго-Уральской антеклизы, в зоне ее сочленения с Прикаспийской синеклизой и Предуральским краевым прогибом. Юго-восточный склон Волго-Уральской антеклизы имеет двухъярусное строение: нижний ярус – кристаллический фундамент, верхний – осадочный чехол. Фундамент сложен породами рифей-

ско-верхнепротерозойского возраста. На основе опубликованных данных и анализа результатов бурения скважин (Орд.-1, Орд.-2 и др.) нами уточнен структурный план поверхности фундамента. Поверхность фундамента характеризуется резкими перепадами абсолютных отметок кровли. В северной части (Татарский свод и Серноводско-Абдулинская впадина) поверхность фундамента залегает на абсолютных отметках от -1700 м до -2200 м, в юго-восточной части (Соль-Илецкий выступ) достигает от -5200 м до -7200 м, а в депрессионных зонах (Ташлинская скважина №25 – южная часть Бузулукской впадины, Урало-Сакмарский прогиб – Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение) они достигают от -5500 м до -6500 м. По данным геофизических исследований [1], поверхность фундамента в Предуральском краевом прогибе погружена на глубину 10–12 км.

В строении осадочного чехла здесь выделяются два структурных этажа: нижний – от ордовикско-силурийских до артинских включительно – и верхний – от нижнепермских кунгурских до четвертичных. Нижний структурный этаж сложен терригенно-карбонатными породами, верхний – сульфатно-известняково-доломитовыми, сульфатно-галогенными и преимущественно терригенными [2, 3].

Продуктивные толщи ОНГКМ сформировались и были законсервированы в осадочных толщах нижнего структурного этажа (от верхнего отдела каменноугольной системы) в контуре Оренбургского вала, расположенного у северного края Соль-Илецкого свода. С севера, через узкий и глубокий прогиб, к Соль-Илецкому своду примыкает Восточно-Оренбургское сводовое поднятие, с запада и востока район также связан, соответственно, с Бузулукской впадиной и Предуральским краевым прогибом, а на юге – с Прикаспийской синеклизой.

Гидронеосистема Южного Предуралья

В толще осадочных пород с точки зрения формирования подземных вод выделяются три структурных этажа: верхнепермско-четвертичный (надсолевой), кунгурский (солевой) и среднедевонско-артинский (подсолевой). Сульфатно-галогенные отложения делят водную систему на два этажа: верхний – зону активного водообмена – и нижний (подсолевой) – с весьма замедленным водообменом.

Согласно схеме гидрогеологического районирования, составленной ВСЕГИНГЕО, рас-

сматриваемая территория входит в состав Восточно-Русского артезианского бассейна подземных вод первого порядка. В качестве гидрогеологических структур более низкого порядка выделяется Сыртовский, Южно-Предуральский, частично Камско-Вятский и Эмбенский артезианские бассейны второго порядка.

В разрезе осадочной толщи Южного Предуралья по геологическому строению выделяются 4 региональных и ряд зональных водоупоров.

Геологическое строение региона обуславливает формирование 10 основных водоносных комплексов [3] (Гидрогеология СССР, т. 43, 1972).

Водоносными являются практически все выделенные стратиграфические комплексы пород – от четвертичных до ордовикско-силурийских.

В верхний этаж входят:

1. Четвертичный водоносный комплекс пресных и слабосоленых вод. Развита в долинах рек, на первой, второй и третьей надпойменных террасах рек Урал и Самара, по крупным речным долинам.

2. Неогеновый слабоводоносный комплекс пластовых, как правило, слабосоленых вод, развит локально, в основном по долинам рек.

3. Меловой водоносный комплекс пластовых солоноватых и пресных вод. Имеет ограниченное распространение, в основном южнее Оренбургского вала. Меловые отложения выходят на поверхность и гидрогеологически открыты.

4. Юрский водоносный комплекс пластовых солоноватых и пресных вод, имеет прерывистое распространение, в основном севернее и южнее Оренбургского вала, приурочен часто к дизъюнктивным мульдам. Породы комплекса выходят на поверхность и чаще гидрогеологически открыты.

5. Верхнепермско-нижнетриасовый водоносный комплекс, представленный скоплениями пластовых солоноватых и пресных вод. Региональные выдержанные водоупоры отсутствуют, локальные водоупоры связаны с глинистыми толщами. Породы комплекса выходят на дневную поверхность и в основном гидрогеологически открыты.

6. Верхнепермский водоносный комплекс, представленный скоплениями пластовых крепких рассолов, соленых, солоноватых и пресных вод. Водоупорными являются сульфатно-галогенные толщи гидрохимической свиты казанского яруса, развитые локально северо-восточнее и восточнее Оренбургского вала. Породы комплекса выходят на дневную поверхность и часто гидрогеологически открыты.

В нижний этаж входят:

1. Московско-кунгурский водоносный комплекс, в состав которого входят скопления порово-трещинно-пластовых крепких и весьма крепких рассолов. С этим водоносным комплексом связаны продуктивные толщи ОНГКМ и ряда месторождений нефти. Этот водоносный комплекс подсолевой водонапорной системы испытывает наибольшее воздействие от добычи углеводородов в связи со снижением пластовых давлений. Региональным водоупором, изолирующим комплекс сверху, являются сульфатно-галогенные породы кунгурского яруса нижней перми.

2. Визейско-башкирский водоносный комплекс представлен палеокарстово-трещинно-пластовыми крепкими рассолами от тульского горизонта до подошвы верейского горизонта среднего карбона. Относительным водоупором здесь являются глинистые известняки с прослоями аргиллитов верейского (местами и каширского горизонтов) мощностью 10–30 м, имеющие региональное распространение.

3. Франско-турнейский водоносный комплекс, представленный порово-трещинно-пластовыми крепкими рассолами от кровли кыновских глин до подошвы бобриковского горизонта. Региональным водоупором является толща глинисто-мергелистых отложений бобриковского горизонта на юге и частично тульского – на севере. В пределах Оренбургского вала ордовикско-верхнедевонский и франско-турнейский водоносные комплексы гидрогеологически связаны из-за размыва девонских отложений, в т. ч. кыновского водоупора.

4. Ордовикско-верхнедевонский водоносный комплекс порово-трещинно-пластовых крепких рассолов. Региональным водоупором для этого комплекса являются глинистые породы кыновского горизонта. Этот водоносный комплекс полностью представлен на Восточно-Оренбургском своде, в Бузулукской впадине и Предуральском прогибе.

Гидродинамическая связь водоносных горизонтов

Вопрос о наличии вертикальной гидродинамической связи между водоносными горизонтами осадочного чехла Южного Предуралья до настоящего времени не имеет однозначного решения. Его решение имеет важное научное и практическое значение для охраны окружающей среды и недр, геодинамических процессов в

естественных и особенно техногенно измененных условиях, поиска и эксплуатации месторождений углеводородов.

Подземные воды верхнего этажа в основном имеют связь с грунтовыми и поверхностными водами, поэтому режим их накопления преимущественно инфильтрационный.

Наличие связи и водообмена между водоносными комплексами нижнего и верхнего гидродинамических этажей по вертикали ряд исследователей (Б.Л. Личков, Н.К. Игнатович, Н.И. Толстихин, Е.В. Посохов, И.К. Зайцев, Е.Ф. Станкевич и многие другие) отрицают из-за наличия регионального сульфатно-галогенного водоупора. Наши исследования показывают наличие этой связи.

Подтверждением является практически прямолинейная зависимость давления в водоносных горизонтах палеозоя Бузулукской впадины от глубины их залегания [2] (рис. 1).

Большинство точек находится на линии нормального гидростатического давления ($\Delta p = 1 \text{ кг/см}^2$ на 10 м) или в непосредственной близости от нее. Следовательно, фактическое пластовое давление в палеозойских горизонтах контролируется высотой столба воды и ее средневзвешенным объемным весом над точкой замера.

В районе ОНГКМ также наблюдается практически прямолинейная зависимость давления в водоносных горизонтах. Все водоносные горизонты нижнего этажа независимо от глубины их залегания имеют относительно близкие приведенные статические уровни. В границах месторождения средняя абсолютная отметка приведенных статических уровней до его разработки была лишь на 0–7 м выше урезов воды р. Урал в межень (73–80 м), дренирующей исследуемую территорию и под долиной которой проходит тектонический разлом.

Если учесть дополнительный напор подземных вод зоны активного водообмена на водосборе относительно меженного уровня реки, то, по-видимому, будет иметь место динамическое равновесие между верхним и нижним этапами водоносных горизонтов в естественных, продолжительное время неизменяемых условиях. Следовательно, можно сделать предварительный вывод о наличии гидродинамической связи через мощную толщу отложений солей. Она может проходить через тектонические трещины и разломы.

Сравнение статических уровней водоносных горизонтов нижнего этажа с учетом их

удельного веса и среднего удельного веса выше расположенных водоносных горизонтов на ОНГКМ и на расстояниях до 50 км, 100 км и более 100 км на север от него показало наличие гидродинамической связи его пластовых вод с водами верхнего этажа до Волго-Уральского водораздела. Сравнение приведенных статических уровней подземных вод бассейна р. Урал с уровнями примыкающих с севера подземных вод Волжского бассейна не выявляет гидродинамической связи между ними. В них свои системы вертикального и латерального водообмена. Это соответствует пластово-блоковой модели строения глубоких горизонтов слоистых геологических и водных систем платформ [4].

Анализ соотношений приведенных статических уровней водоносных горизонтов верхнего и нижнего этажей с урезами воды в реках до начала разработки ОНГКМ и месторождений нефти показывает, что они динамически связаны. Сложная система движения и водообмена в водоносном комплексе подземных вод Южного Предуралья и многофакторность воздействия на них добычи углеводородов обуславливают необходимость применения математического моделирования при прогнозировании последствий техногенных изменений в них. Наши исследования изменений в пластовых водах на разрабатываемых месторождениях углеводородов показали, что наиболее распространенным является образование в них постепенно расширяющихся гидродинамических воронок. В результате изменяются динамика и направления движения в прилегающих водоносных горизон-

тах. Их воды постепенно восстанавливают техногенно утраченное давление в гидродинамической воронке и заполняют освободившиеся объемы порового пространства при добыче углеводородов. Скорость этих процессов зависит от параметров гидродинамической воронки и водно-физических свойств водовмещающих пород.

Математическая модель развития гидродинамической воронки

В результате интенсивной эксплуатации месторождений углеводородов, понизившей пластовое давление в нижнем этаже подземных вод региона на десятки и даже сотни атмосфер, нарушилось естественное гидродинамическое равновесие между верхним и нижним этажами подземных вод. В районе месторождений создались условия для нисходящего движения вод над его пластовыми водами и восходящего под ними, а также латерального притока с прилегающих территорий. Нами более детально изучены техногенно нарушенные динамические процессы на ОНГКМ.

На месторождении ведутся наблюдения за состоянием пластовых вод на специально оборудованных параметрических скважинах. В работах [6] по мониторингу сформировавшейся гидродинамической воронки на ОНГКМ приводятся и анализируются данные по 19 пьезометрическим скважинам, полученные в 2001 и 2004 гг.

Месторождение ОНГКМ занимает площадь около $S = 2500 \text{ км}^2$, а уменьшение давлений в пластовых водах в результате добычи газа произошло на площади более 4000 км^2 . В цент-

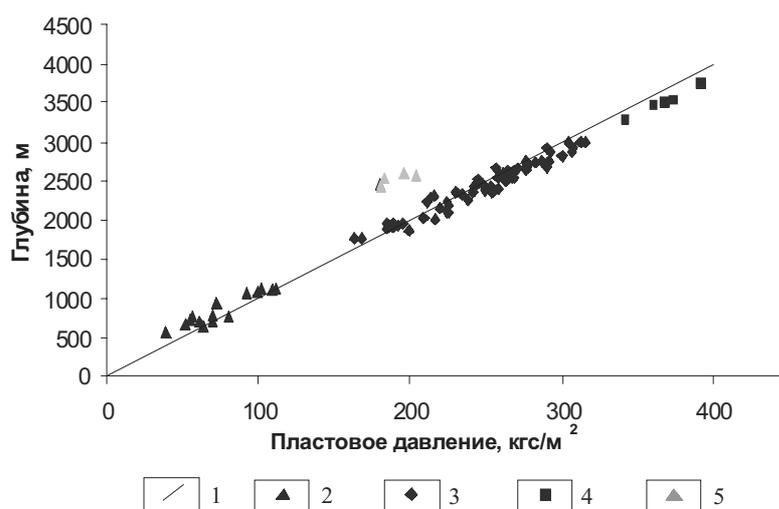


Рисунок 1. Связь между пластовым давлением и глубиной залегания горизонтов. 1 – линия нормального гидростатического давления; 2 – воды пермского возраста; 3 – воды карбона; 4 – воды девона; 5 – воды карбона с техногенно нарушенным давлением.

ральной части месторождения давление пластовых вод уменьшилось более чем на 10 МПа, а в среднем – на 6 МПа. Это привело к изменению гидродинамического и энергетического балансов и накоплению потенциальной энергии. Обводнение залежи и сейсмические события, наблюдаемые в районе месторождения, свидетельствуют о происходящей разгрузке напряжений в геологической среде [5].

На интенсивно разрабатываемых месторождениях нефти в Южном Предуралье также формируются гидродинамические воронки. По нашим данным, установившиеся уровни вод средне-турнейского комплекса в Бузулукской впадине после разработки месторождений нефти понизились более чем на 200 м. В центральной части ряда месторождений пластовое давление уменьшилось на 10 МПа и более, образовав гидродинамические воронки диаметром 10–30 и более километров.

В связи с этим необходимы специальные исследования механизма формирования и последствий техногенных изменений и построение математической модели развития гидродинамической воронки.

Сформировавшаяся депрессионная воронка в пластовых водах карбона района ОНГКМ обусловила фильтрационный поток по латерали q_T и вертикали q' из выше- и нижележащих горизонтов (рис. 2). На рис. 2 представлена схема движения подземных вод гидродинамической воронки от периферии к центральной части с максимальным понижением пластового давления.

Допустим, что величина фильтрационного потока постоянна для всей площади фильтрации из выше- и нижележащих горизонтов. С одной квадратной единицы площади пласта-покрышки и пласта-подошвы поступает вода, расход которой (измеряемый в мм/с) обозначим q' . Благодаря инфильтрации расход по длине фильтрационного потока оказывается переменным.

Входным живым сечением является $a-b$, выходным – $c-d$. Рассмотрим равномерную фильтрацию, т. е. $q' = q'_{cp} = \text{const}$ (по всей границе продуктивного пласта сверху и снизу). Данная ситуация отражает условия уравнения Роте [7]:

$$\frac{q_T}{k} + \frac{1}{2} \frac{q'}{k} L = \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}. \quad (1)$$

Из (1) при заданных L, h_1, h_2, q' и k можем получить транзитивный расход q_T .

Для построения кривой депрессии воронки ad уравнение (1) перепишем в виде:

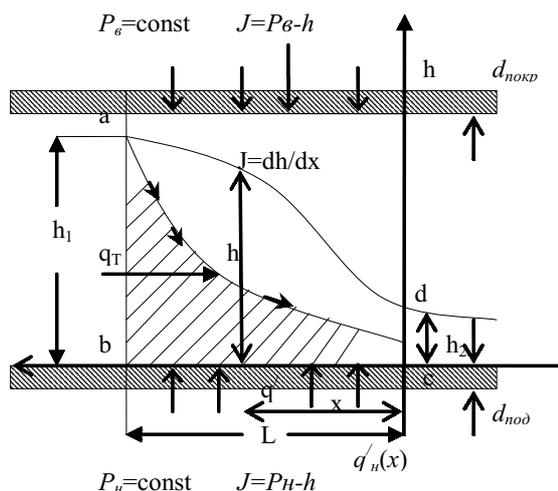


Рисунок 2. Схема движения пластовых вод на разрабатываемых месторождениях углеводородов от периферии к центральной части гидродинамической воронки

$$\frac{q_T}{k} + \frac{q'}{k} (L - \frac{1}{2}x) = \frac{h^2 - h_2^2}{2x}. \quad (2)$$

Задаваясь в этом уравнении различными x и вычисляя соответствующие им h , построим кривую депрессии $h(x)$.

Уравнения пьезометрических уровней гидродинамической воронки (1) и (2) могут быть уточнены, если учесть, что градиент, обеспечивающий переток из выше- и нижележащих водоносных горизонтов, не постоянный и увеличивается от внешних границ к ее центру (рис. 2).

Учитывая строение пласта-коллектора, приток воды, компенсирующий падение давления, возможен по латерали (q_T), по вертикали из вышележащего горизонта ($q'_с(x)$ с коэффициентом фильтрации $k'_с$) и из нижележащего горизонта ($q'_н(x)$ с коэффициентом фильтрации $k'_н$).

Согласно закону Дарси приток через покрывку пласта

$$q'_с = k'_с \frac{P_с - h}{d_{покр}} (L - x), \quad (3)$$

где $P_с$ – давление воды в вышележащем горизонте. Рассматриваем приток с полосы шириной 1 м и длиной $(L-x)$. Аналогично находим приток через подошву пласта:

$$q'_н = k'_н \frac{P_н - h}{d_{под}} (L - x). \quad (4)$$

Суммируя поток по латерали q_T , через покрывку (3) и подошву (4) пласта, получим общий поток:

$$q = q_T + k'_v \frac{p_b - h}{d_{\text{покр}}} (L - x) + k'_h \frac{p_h - h}{d_{\text{под}}} (L - x). \quad (5)$$

С другой стороны, по закону Дарси

$$q = wv = (1 * h) \left(k \frac{dh}{dx} \right) = kh \frac{dh}{dx}, \quad (6)$$

где k – коэффициент фильтрации в пласте.

Приравнявая (5) и (6), получим дифференциальное уравнение фильтрации в депрессионной воронке месторождения:

$$q_T + k'_v \frac{p_b - h}{d_{\text{покр}}} (L - x) + k'_h \frac{p_h - h}{d_{\text{под}}} (L - x) = kh \frac{dh}{dx}. \quad (7)$$

Решение $h(x)$ дифференциального уравнения (7) есть депрессионная кривая $a-d$ на рис. 2 в момент времени t .

Рассмотрим развитие депрессионной кривой во времени. Падение давления в результате добычи газа и воды создает движение воды к центру воронки с общим расходом Q в напорной системе. Согласно [7] общий расход Q может быть вычислен по формуле:

$$Q = 2,73 \frac{a(H_0 - h_0)}{\lg R - \lg r_0} k, \quad (8)$$

где a – мощность пласта, м; H_0 и h_0 – пьезометрический уровень за пределами гидродинамической воронки и в ее центре, м; R – радиус депрессионной воронки, м; r_0 – радиус наибольшего понижения давления, м; k – коэффициент фильтрации, м/сут.

Время восстановления природного динами-

ческого баланса может быть оценено по формуле:

$$t = \frac{V_g}{365 * Q}, \text{ лет}, \quad (9)$$

где V_g – объем добытого газа при начальном давлении.

Выводы

1. Добыча углеводородов приводит к падению давлений пластовых вод и нарушению естественного гидродинамического равновесия в подземных водах.

2. Выявлено наличие межпластовых перетоков вод в освободившееся при добыче углеводородов пространство в геологической среде за счет притока вод по латерали и инфильтрации из ниже- и вышележащих водоносных горизонтов.

3. Построена фильтрационная модель заполнения гидродинамической воронки пластовыми водами с учетом инфильтрации в них из выше- и нижерасположенных водоносных горизонтов на разрабатываемых месторождениях углеводородов.

4. Предложен метод оценки времени восстановления естественного гидродинамического равновесия в подземных водах разрабатываемого месторождения углеводородов на основе расчета скорости фильтрации воды к центру гидродинамической воронки и освободившегося при добыче углеводородов пространства в геологической среде.

12.05.2010

Список использованной литературы:

1. Резанов И.А. Сверхглубокое бурение. – М.: Наука, 1981. 160 с.
2. Нестеренко Ю.М., Глянцев А.В. Водоносные комплексы Бузулукской впадины и их взаимодействие // Реферированный журнал Нефтепромышленное дело, №12, 2007. С. 30-33.
3. Нестеренко Ю.М., Глянцев А.В. Влияние объектов нефтяной и газовой промышленности на гидрогеологические системы в нефтегазоносных бассейнах. Оренбургский Научный центр УрО РАН // Сборник «Водохозяйственные проблемы и рациональное природопользование»: Часть 1. Оренбургский ун-т; Перм. ун-т и др. – Оренбург – Пермь, 2008. – С. 229-231.
4. Дюнин В.И. Гидрогеодинамика глубоких горизонтов нефтегазоносных бассейнов. М.: Научный мир, 2000. 472 с.
5. Нестеренко Ю.М., Нестеренко М.Ю. Влияние добычи полезных ископаемых на геогидродинамику и сейсмичность в Южном Предуралье // Материалы XV Всероссийской конференции «Геологические опасности». – Архангельск, 2009 г., с. 333-335.
6. Севастьянов О.М., Захарова Е.Е. Особенности обводнения скважин и газоконденсатной залежи ОНГКМ // Газовая промышленность. 2004. – №10. – С. 80–82.
7. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

Сведения об авторах: Нестеренко Максим Юрьевич, доцент кафедры математического обеспечения информационных систем Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 2132, тел. (3532)372534, e-mail: mois@mail.osu.ru

Нестеренко Юрий Михайлович, зав. Отделом геоэкологии Оренбургского научного центра УрО РАН, доктор географических наук, доцент 460014, ул. Набережная, 29, тел. (3532) 770660, e-mail: geoecol-onc@mail.ru