В РАЗВИТИЕ ИДЕЙ М.А. ГЛАЗОВСКОЙ

УДК 502.1

Н.С. Касимов[1], **Д.В. Власов**[2]

ТЕХНОФИЛЬНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

Технофильность, предложенная А.И. Перельманом, показывает связь интенсивности использования химических элементов цивилизацией с их средним содержанием в литосфере. Рассчитана технофильность элементов в первом десятилетии XXI в. и предложены сценарии ее изменения на конец текущего столетия. Рассмотрены направленность, темпы и причины изменения технофильности химических элементов с 1960-х до 1980-х гг., а также с 1980-х гг. до конца первого десятилетия XXI в. Проведено сравнение полученных данных о темпах и направлении изменения величины технофильности химических элементов с прогнозами А.Е. Ферсмана, которые он сделал в середине 30-х гг. XX в. Введен новый показатель — региональная технофильность, показывающая интенсивность процесса техногенеза на уровне отдельных государств. Проведена геохимическая типология стран мира по уровню региональной технофильности.

Ключевые слова: технофильность, техногенез, добыча элементов, геохимическое страноведение.

Введение. Проблемам техногенеза, изучению техногенного преобразования и устойчивости природных и техногенных ландшафтов посвящены многие работы М.А. Глазовской. Так, она пишет об “ожелезнении” земной поверхности в середине 60-х гг. XX в. в результате включения все большей массы железа в техническую деятельность человеческого общества, отмечает большую роль Al, S, P, K в глобальных техногенных процессах на основе рассчитанных отношений ежегодной добычи химических элементов к площади поверхности земной суши и поверхности ойкумены [3]. За прошедшие полвека соотношения используемых в технической деятельности химических элементов претерпели значительные изменения.

Еще А.Е. Ферсман [9], а затем А.И. Перельман [7] обратили внимание на связь интенсивности использования химических элементов нашей цивилизацией с их средним содержанием в литосфере — кларками. Элементы могут иметь близкие химические свойства, например Si и Ge, но кларк Si составляет 29,5%, а Ge — $1{,}4 \cdot 10^{-4}$% [1], поэтому их ценность для хозяйства, экономическая значимость, масштаб добычи и технологии получения резко различны. Как образно отметил А.И. Перельман, если бы Ge имел такой же высокий кларк, то он так же широко применялся бы, как и Si, т.е. шел бы на изготовление кирпича, бетона, цемента и т.д. Исключительная роль железа в истории цивилизации связана не только с его свойствами, но и с его большим кларком.

Масштабы ежегодной добычи химических элементов из недр составляют миллиарды тонн для C (уголь, нефть, природный газ, графит, алмазы, известняк и т.д.), сотни миллионов тонн для Fe и десятки тонн для ультрамикроэлементов (Tl, Pt, Th, In и др.). Для понимания основных тенденций интенсивности извлечения из недр и использования химических элементов при техногенезе А.И. Перельман [7] предложил понятие “технофильность” (T) — отношение ежегодной добычи или производства элемента в тоннах к его кларку в литосфере в процентах. Этот показатель не имеет физического смысла, так как измеряется в т/%, но его можно использовать в качестве информационного коэффициента, отражающего ту или иную степень регулирующей роли кларка в различные этапы технологического развития общества. Одни элементы человечество извлекает из руд пропорционально их среднему содержанию в земной коре (Cd, Hg, U, Mo, Ti, Zr), для других элементов такая зависимость отсутствует. Огромная контрастность (от $n \cdot 10^4$ до $n \cdot 10^{11}$) и динамичность (высокая вариабельность объема добычи) технофильности различных элементов позволяют использовать ее в качестве одного из общих показателей техногенеза.

Материалы и методы. Для оценки технофильности в начале XXI в. использованы данные о добыче химических элементов и их соединений в мире в целом и по отдельным странам. В основном это информация об объемах производства элементов из ежегодных отчетов Геологической службы США (U.S. Geological Survey) за 1999—2010 гг. [13], а также из [6, 12] и кларки элементов по А.П. Виноградову [1].

Существуют и иные оценки кларков элементов в земной коре [11, 14]. Если использовать кларки К.Х. Ведеполя [14], то технофильность многих элементов бу-

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, декан, зав. кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв, академик РАН, *e-mail*: dean@geogr.msu.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, студент, *e-mail*: vlasgeo@yandex.ru

дет несколько отличаться от технофильности, рассчитанной по кларкам Виноградова. Так, кларки Mn, Yb, Cr, Ho, Lu, Ni, Cu и In по Виноградову в 2—5 раз больше, а кларки S, I, Cl, N, Hf, Bi, C — в 2—16 раз ниже, чем по Ведеполю, т.е. технофильность этих элементов будет в 2—5 раз меньше и в 2—16 раз выше при использовании в расчетах среднего содержания по [1], чем по [14]. Поскольку каждый последующий ранг технофильности отличается от предыдущего в 10 раз, а также потому, что у Ведеполя отсутствуют данные о Pd, Te, Pt и Au, в исследовании использованы кларки химических элементов в земной коре по Виноградову [1].

Обсуждение результатов. А.И. Ферсман показал, что добыча основных металлов за XIX в. возросла примерно в 100 раз [9]. К 1934 г., когда он проводил свои расчеты, резко увеличилось использование Al, Cu, Mo, W, K (примерно в 200—1000 раз); Fe, C, Mn, Ni — в 50—60 раз; Zn, Pb, Na + Cl, S, P, Au — в 15—40 раз; Ag, Sn, U, Co, Hg — до 10 раз. “Особый рост добычи в последние годы обнаруживают металлы, связанные с металлургией железа (Fe, Mn, Mo, W, Cr, Ni), элементы электротехники и воздухоплавания (Al, Cu, редкие металлы) и сельского хозяйства (N, P, K)”, — писал А.Е. Ферсман в 1934 г.

Технофильность в середине 1960-х гг. А.И. Перельман рассчитал технофильность для середины 60-х гг. [7]. На рис. 1 хорошо видна максимальная технофильность углерода за счет его колоссальной концентрации в горючих ископаемых (уголь, торф, нефть, природный газ), а также в алмазах, графите и известняке на фоне относительно низкого содержания в литосфере ($2{,}3 \cdot 10^{-2}$%) [1]. Высокую технофильность имели некоторые тяжелые металлы (Pb, Cu, Cd, Hg, Bi), Fe и Ca, элементы солей (Na, Cl и S), а среди редких элементов — Te и Ru. Низкая технофильность была характерна для малоиспользуемых тогда большинства редких элементов (Th, Ga, Y, In, Tl, Hg, Ge, Be, Nb, Li, Rb, TR), V и Sr. По сравнению с 1930-ми гг. резко возросла технофильность U в связи с его использованием в атомной энергетике, а Mg — в основном за счет производства титано-магниевых сплавов, а также некоторых других элементов.

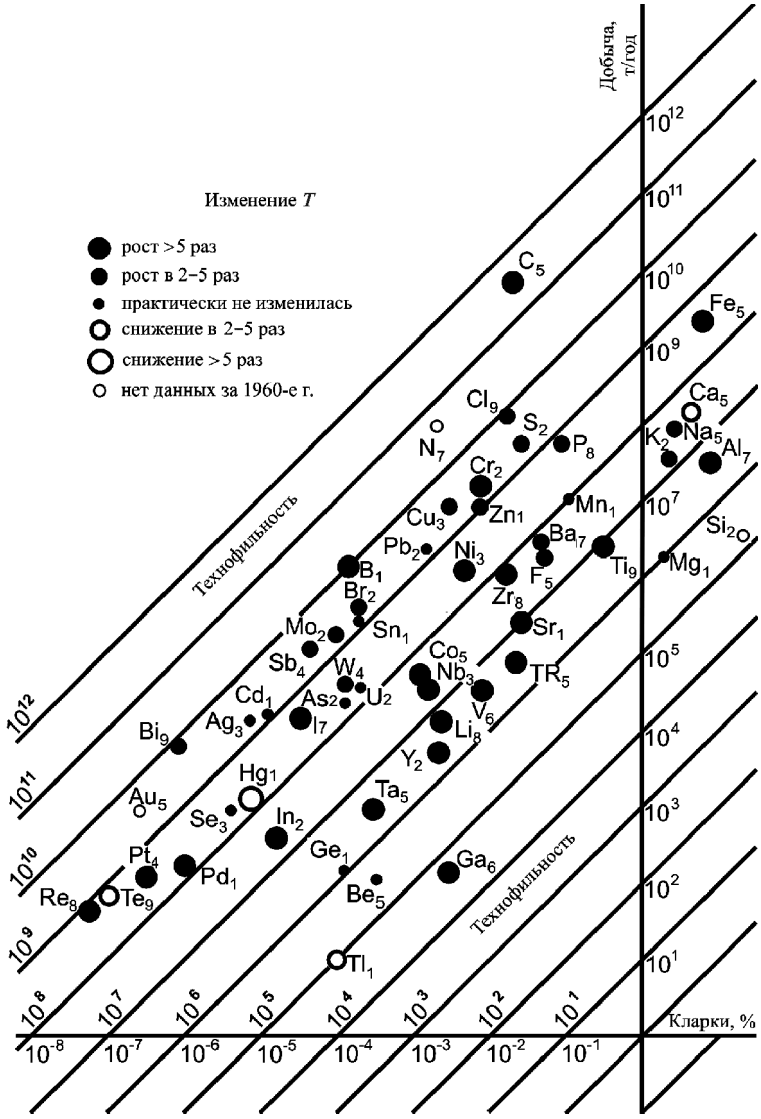

Рис. 1. Изменение технофильности с 1960-х по 2000-е гг. Положение кружка — уровень технофильности в 2008 г. Размер кружка — величина изменения *T* элемента. Цифра — множитель уровня *T*

Технофильность в конце 1980-х гг. За следующие два десятилетия технофильность элементов росла медленнее, чем в первой половине XX в. Расчеты, выполненные в конце века с использованием данных Дж. Эмсли о ежегодной добыче элементов [10], показали, что среди наибольших “технофилов” за счет увеличения добычи нефти и природного газа продолжала расти, но не так сильно, как прежде, технофильность C. Выявилась новая тенденция — рост технофильности Cl, Si, I, B, P (фосфорные удобрения), продолжилось увеличение технофильности Mg (магнезит, доломит, сплавы). Среди металлов слабо увеличилась технофильность Fe и Cu. Развитие космической техники, электроники, теплоэнергетики в 5—10 раз увеличило технофильность редких металлов (Th, In, Hf, Nb, Zr, Be, Yb, Ge). В то же время у большинства тяжелых металлов она практически не повысилась [8].

Ю.Н. Водяницкий [2] на основе данных о добыче элементов в начале 1990-х гг. [4] рассчитал технофильности тяжелых и сверхтяжелых металлов и металлоидов. Он предложил несколько усовершенствовать показатель: $T = 100 \cdot Дi/(Ki \cdot M)$, где *Дi* — добыча *i*-го элемента, т/год; *Ki* — кларк элемента в литосфере, %; *M* — масса земной коры, равная $2{,}8 \cdot 10^{19}$ т; что сделало технофильность безразмерным коэффициентом. В статье использован расчет *T*, впервые предложенный А.И. Перельманом, а сравнение с массой земной коры проводится по мере необходимости.

Технофильность в начале XXI в. Новейшие данные о добыче элементов в 2000-х гг. [6, 12,

13] позволили оценить современные тенденции изменения технофильности (рис. 1, 2). Практически не изменилась *T* главных технофилов 80-х гг. — C, Cl и S, а также Au, U, Ge и K. Примечательно, что в начале века продолжилось "ожелезнение" планеты, установленное еще в середине 1960-х гг. М.А. Глазовской [3], — увеличилась технофильность Fe и, по-видимому, вслед за ней за счет повышения загрязнения в развивающихся странах возобновился рост технофильности многих поллютантов — тяжелых металлов (Bi, Ag, Sn, Cu, Zn, Cr, Ni, Co, Mo), а также Sb и As. Однако наметившийся перевод автотранспорта на экологически чистые виды топлива не позволил возрасти технофильности Pb. Таким образом, в последнее время подтвердилась тенденция не просто к "ожелезнению", а к более масштабному явлению — "металлизации" поверхности нашей планеты.

Использование азотных удобрений и производство биотоплива привели к увеличению технофильности N. Из редких элементов слабый рост *T* отмечен у Nb, редких земель и Ga.

Однако самая яркая тенденция первого десятилетия XXI в. — увеличение более чем в 5 раз технофильности ультрамикроэлементов Pt, Pd, стоимость которых росла на мировых рынках, а также Re, In, V, Y (рис. 3), среди макроэлементов — Mg (использование в автомобилестроении для снижения снаряженной массы транспортных средств), что предсказывали Ферсман и Перельман, а также Si (производство строительных материалов, кремнийорганических соединений, широкое применение в вычислительной технике и электронике и др.). Отметим сильное снижение технофильности самых опасных поллютантов, например Hg, или отсутствие роста технофильности Cd, что соответствует общей тенденции к уменьшению использования этих токсичных металлов в промышленном производстве.

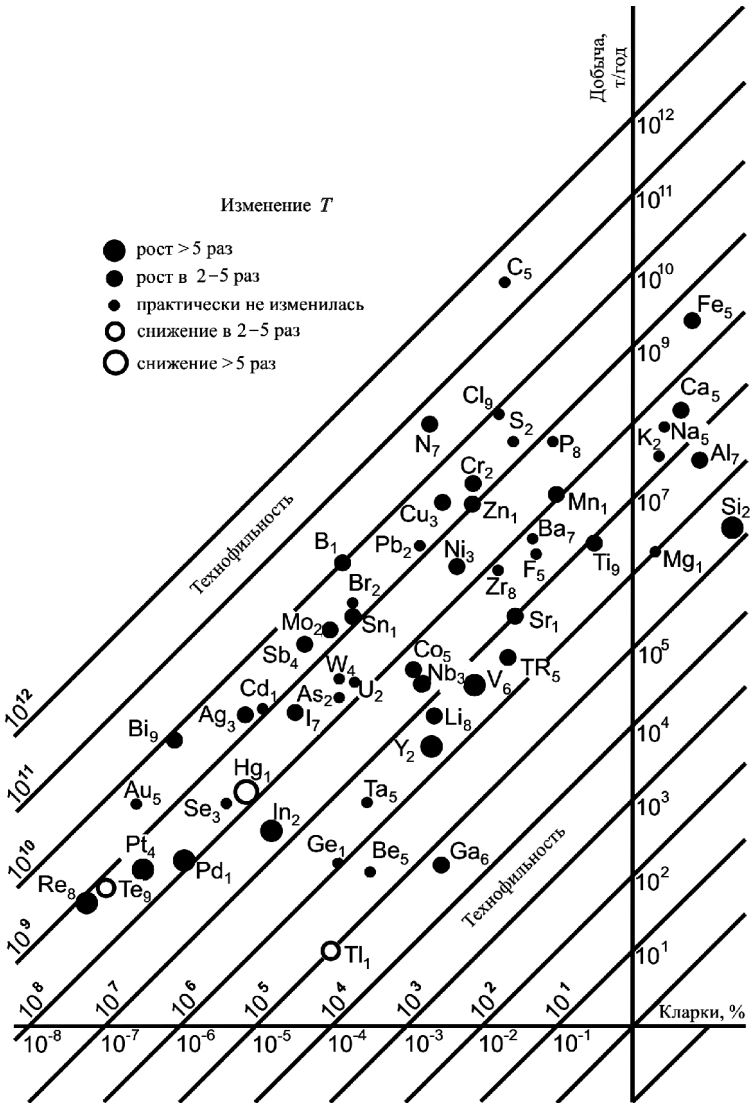

Рис. 2. Изменение технофильности с 1980-х по 2000-е гг. Положение кружка — уровень технофильности в 2008 г. Размер кружка — величина изменения *T* элемента. Цифра — множитель уровня *T*

На графике изменения технофильности за последние 20 лет (рис. 2) достаточно четко проявляется "полоса стабильности", расположенная в пределах значений *T* примерно от 10^9 до 10^{10}. Элементы, находящиеся сейчас (или в будущем) выше этой полосы, в той или иной степени являются опасными продуктами техногенеза. В настоящее время к их числу относится углерод. Широкое использование его в энергетике повлекло резкий рост выбросов CO_2 и увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере. Вполне возможно, что превышение у каких-либо элементов значения технофильности, равного 10^{10}, может повлечь возникновение новых или усугубление уже существующих глобальных эколого-экономических проблем.

Можно предположить, что элементы, расположенные ниже "полосы стабильности", технофильность которых меньше 10^9, в течение XXI в. либо войдут, либо вплотную приблизятся к этой полосе. Согласно тенденциям изменения *T* элементов за последние 20 лет (рис. 2), к этой "полосе" стали быстро приближаться наиболее активно используемые в настоящее время в разных отраслях хозяйства Re, Pt, Pd, In, Y, V, Nb, TR, Si, которые образуют "вектор роста", что может быть свидетельством основной тенденции техногенеза, выражающейся в росте технофильности большинства элементов.

Очевидно, что дальнейшее прекращение роста их технофильности — непременное условие сохранения биосферы. В дальнейшем человечеству придется активно бороться с ростом технофильности, замедлять его и снижать *T* наиболее экологически опасных элементов (Hg, Cd и других тяжелых металлов).

Изменение технофильности отдельных элементов за последние полвека. В целом за последние 50 лет (с 60-х гг. XX в. до начала XXI в.) технофильность многих элементов увеличилась достаточно сильно. По характеру изменения технофильности все химические элементы можно разделить на несколько групп.

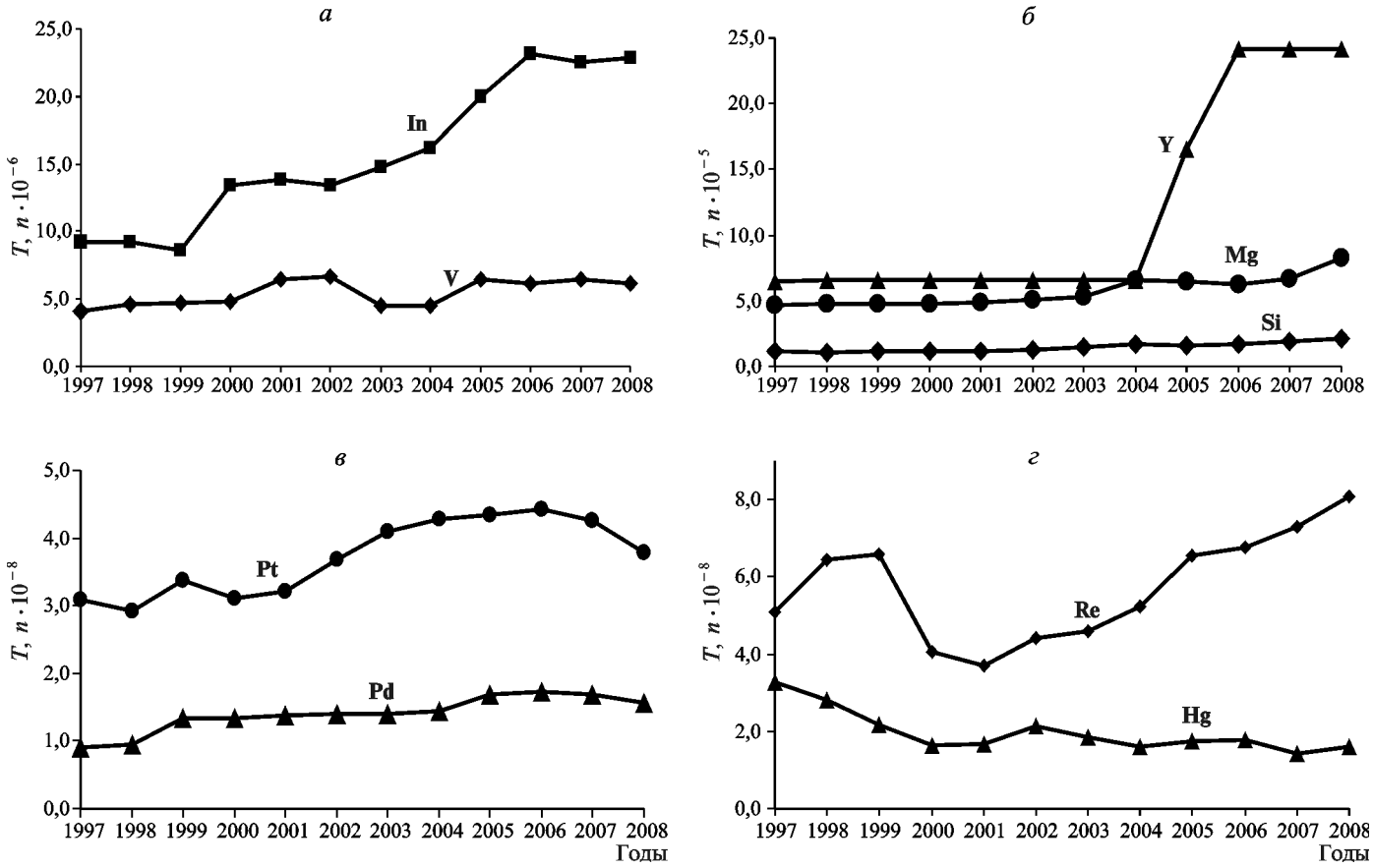

Рис. 3. Технофильность некоторых элементов в 1997—2008 гг.: *а* — индия и ванадия; *б* — магния, кремния и иттрия; *в* — палладия и платины; *г* — рения и ртути

Группа повышенного роста T (*>5 раз*). Рост технофильности более чем в 5 раз за период с 1960-х по 2000-е гг. характерен для C (добыча угля, нефти, природного газа, алмазов, графита, карбонатов и т.д.), Fe (добыча железной руды для производства стали, чугуна и т.д.), Ti (высокопрочные сплавы, применяемые в авиации, судостроении и ракетной техники), Sr (сплавы используют в радиоэлектронной промышленности, металлургии, соединения применяют в пиротехнике). За прошедшие полвека возросла добыча цветных металлов Ni, Al, применяемых в разных отраслях промышленности, в основном в авиакосмической. Резко увеличилось производство редкоземельных (TR — машиностроение, химическая промышленность, радиоэлектроника, металлургия, приборостроение, атомная техника) и рассеянных (Y — атомная энергетика, металлургия, авиастроение; In — микроэлектроника, космическая промышленность, производство жидкокристаллических экранов, астрономических зеркал, радиофармацевтических препаратов; Ta — производство жаростойких и коррозиеустойчивых сплавов, бронебойных снарядов, использование в медицине, авиакосмической промышленности; Ga — производство лазеров, смазочных материалов, металлических клеев; Re — использование вместо Pb для получения товарного бензина, применение в прочных и пластичных сплавах, входит в состав деталей масс-спектрометров, реактивных двигателей; Nb — ракетостроение, авиационная и космическая техника, радиотехника, атомная энергетика, электроника) элементов.

Особо отметим ускоренный рост добычи драгоценных металлов (Pt, Pd) не только для ювелирных целей, но и для применения в медицине, военной промышленности, производстве бессвинцового бензина, электродов для получения многих химических соединений, а также в качестве катализаторов.

К рассматриваемой группе относятся также Cr (легирование стали и создание постоянных магнитов) и Co (легирование стали, производство постоянных магнитов, литиевых аккумуляторов, применение в качестве катализатора). Возросла технофильность неметаллов B (электроника, медицина, металлургия, атомная промышленность, а также получение сверхпроводящих сплавов) и I (медицина, радиоэлектроника, производство литиево-йодных аккумуляторов для электромобилей). К этой группе относятся также Li (электроника, производство литиевых источников питания и лазерных материалов), Zr (ядерная энергетика, пиротехника, создание медицинских инструментов, протезов, производство сверхпроводящих сплавов, кислотостойких материалов), V (создание нержавеющих сплавов и литиевых аккумуляторов, использование в атомно-водородной энергетике). Более чем в 5 раз за прошедшие полвека увеличилась технофильность Si (солнечная энергетика, микроэлектроника, металлургия, кремнийорганические соединения).

Группа умеренного роста T (в 2—5 раз). В нее входят Na и Cl (добыча пищевой соли), P и K (использование в сельском хозяйстве в качестве удобрений), галогены F (производство фреонов, применение в ракетной технике и медицине, выплавка Al с потреблением Na_3AlF_6) и Br (медицина, ракетная техника, применение 1,2-дибромэтана вместо тетраэтилсвинца в топливе), а также S (производство серной кислоты, сульфитов, резиновых изделий, применение в сельском хозяйстве для борьбы с вредителями) и Ba (атомно-водородная энергетика, ядерная энергетика, оптика, пиротехника, антикоррозийные сплавы). Увеличение *T* в 2—5 раз отмечено также для Mo (жаропрочные и антикоррозийные сплавы, части литиевых аккумуляторов, в красителях), Bi (микроэлектроника, медицина, металлургия, ядерная энергетика), W (электротехника, жаростойкие и кислотоустойчивые сплавы, производство снарядов, брони и других компонентов вооружения, входит в состав частей баллистических ракет, самолетов), Sb (полупроводниковая промышленность, антифрикционные сплавы, типографское оборудование, медицина), Cu (электротехника, сплавы, производство труб, кабелей и т.д., ювелирные изделия) и Zn (оцинковка металлических поверхностей, медицина, сплавы, производство шин, масляных красок).

Мы не располагаем данными о производстве N в 1960-х гг. Однако N, P, K активно используются в сельском хозяйстве в качестве удобрения, а N еще и в производстве химических реагентов, жидкий азот — в некоторых охладительных установках, поэтому можно предположить, что технофильность N за последние полвека возросла в 2—5 раз или даже более (аналогично T_P и T_K).

Группа стабилизации T. В нее входят элементы, технофильность которых практически не изменилась за прошедшие 50 лет, — это Ag, Sn, Be, Mg, Mn, Cd, Pb, Se, As, Ge, U. Отметим, что T_{Au} за последние 20—30 лет практически не изменилась, поэтому, интерполируя это на 50 лет назад, можно предположить, что T_{Au} за полвека либо слабо изменилась, либо возросла не более чем в 5 раз.

Группа умеренного снижения T (в 2—5 раз). К этой группе относятся Te, Tl, Ca. Снижение технофильности этих элементов может быть обусловлено недостаточностью данных о производстве Te и Tl в некоторых странах, в том числе в США, либо их заниженностью и недоучетом добычи известняка, что сказывается на *T* кальция.

Группа максимального снижения T (>5 раз). В нее входит только Hg. Ранее [7, 8] снижение *T* не наблюдалось ни для одного элемента. Вполне вероятно, что резкое сокращение технофильности Hg обусловлено осознанием человечеством экологической опасности ртути, негативным влиянием на живые организмы ее повышенного содержания в компонентах ландшафтов и в окружающей среде в целом. Все это вполне могло привести к отказу или частичному уменьшению использования Hg в некоторых производствах.

А.Е. Ферсман [9] наметил темп изменения технофильности элементов на XX в. Предсказания Ферсмана о динамике *T* в общем оправдались по данным о добыче за 1960—2000-е гг. Подтвердился прогноз резкого увеличения производства Al, Fe, C, Ni (хотя пока темп роста не достиг предполагаемых уровней). Для Ag, Sn и U характерна стабилизация *T*. Оправдался также замедленный рост *T* для Zn, P, S, Na, Cl (увеличение произошло всего в 2—5 раз, а предсказывалось в 15—40 раз, однако прошло всего полвека). Несколько не оправдалось максимальное, по предсказаниям, повышение *T* для W, Cu, Mo, K: их производство растет, но не очень быстро: за 50 лет добыча выросла всего в 2—5 раз, однако может ускориться за следующие 50 лет, т.е. направленность изменения предсказана верно. Подчеркнем, что не произошло быстрого роста производства Mn, объем добычи которого практически не изменился за последние 50 лет. А.Е. Ферсман также не учел возможность снижения уровня добычи элементов, например Hg, но он писал о задержанном росте T_{Hg}, что в будущем может оправдаться, если добыча ртути вновь начнет расти.

Исходя из данных о добыче элементов за последние 20 лет можно предположить три вероятных сценария изменения их технофильности: линейный рост; экспоненциальный рост; попадание в “полосу стабильности” (таблица).

Сценарии изменения технофильности химических элементов в XXI в.

Изменение *T* в XXI в. относительно уровня 2000-х гг.	Сценарии		
	линейный рост	экспоненциальный рост	попадание в “полосу стабильности”
Рост >50 раз	Re, Y	Al, B, Bi, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, I, In, Li, Mg, Mn, Mo, N, Nb, Ni, Pd, Pt, Re, Sb, Si, Sr, TR, V, Y, Zn	Al, Be, Ga, Ge, In, K, Li, Mg, Nb, Si, Sr, Ta, Ti, Tl, TR, V, Y
Рост от 5 до 50 раз	Ag, Al, B, C, Bi, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, I, In, Li, Mg, Mn, Mo, N, Nb, Ni, Pd, Pt, Re, Sb, Si, Sn, Sr, Ti, V, Y, Zn, Zr, TR	Ag, Au, C, Ca, Ge, Sn, Ti, Zr	As, Ba, Ca, Co, F, Fe, I, Na, Ni, Pd, Pt, Se, W, U, Zr
Стабилизация	As, Au, Ba, Br, Cd, Cl, F, Ge, Na, P, S, Ta, W, U	As, Ba, Br, Cd, F, Na, P, Pb, S, Se, Ta, W, U	Ag, Au, Br, Cd, Cr, Cu, Hg, S, P, Mo, Pb, Re, Sb, Sn, Te, Zn
Снижение от 5 до 10 раз	Be, K, Pb, Se	—	B, Bi, Cl
Снижение >10 раз	Hg, Te, Tl	Be, Hg, K, Te, Tl	C, N

Линейный рост — темп изменения технофильности элементов за прошедшие 20 лет сохранится на протяжении всего XXI в., т.е. T в начале XXII в. (T_{XXII}) будет следующей: $T_{XXII} = 5(T_{2000}/T_{1980})$, где T_{2000} — технофильность элемента в 2000-е гг., а T_{1980} — в 1980-е.

Экспоненциальный рост — каждые последующие 20 лет после 2000-х гг. в течение всего XXI в. технофильность элементов будет возрастать во столько раз, во сколько возросла T с 1980-х по 2000-е гг. Таким образом, в начале XXII в. технофильность элементов будет $T_{XXII} = (T_{2000}/T_{1980})^5$.

Попадание в "полосу стабильности" — предполагается, что технофильность элементов в результате технологического прогресса человеческого общества будет стремиться к условной "полосе стабильности", о которой уже упоминалось ($T = 10^9 \div 10^{10}$). Исходя из этого рассчитывается величина изменения T (n, раз) за весь XXI в.: $n = 10^9/T_{2000}$ для элементов, технофильность которых меньше 10^9, и $n = T_{2000}/10^{10}$ для элементов, технофильность которых больше 10^{10}.

Наиболее вероятен сценарий попадания в "полосу стабильности", поскольку элементы, технофильность которых растет или сохраняется на высоком уровне в других сценариях, уже сейчас представляют или будут представлять в ближайшем будущем реальную экологическую угрозу для человеческого общества и окружающей природной среды (тяжелые металлы и, возможно, углерод).

Технофильность отдельных стран. Для оценки техногенного вклада различных стран мира в общую технофильность с учетом добычи всех химических элементов рассчитана *региональная технофильность* (T_R) для 91 страны мира: $T_R = \Sigma[\lg(P_i/K_i)]$, где P_i — добыча (производство) i-го химического элемента в стране, т/год; K_i — кларк i-го элемента в литосфере, % (рис. 4). В отчетах Геологической службы США [13] приведены данные о добыче элементов и их соединений во всем мире в целом и в 5—20 лидирующих странах, поэтому некоторые страны не учитывались при расчете T_R и их нет в геохимической типологии.

По величине T_R элементы разделены на 5 групп, которые при переходе к каждой последующей группе выделялись путем удвоения показателя. Группы подразделяются на подгруппы по числу производимых в странах химических элементов: "полиэлементые" (30 стран), "трехэлементные" (18), "биэлементные" (17) и "моноэлементные" (26).

Очень высокая T_R (*>200*). Это "полиэлементные" страны, региональная технофильность которых зависит от добычи многих химических элементов. Лидер в этой группе Китай (361), в нее также входят основные ресурсодобывающие страны — Россия (266), Канада (245) и США (216).

Высокая T_R (*200—100*). Это 8 "полиэлементных" стран со значительной добычей тех или иных полезных ископаемых (по уменьшению T_R): Австралия, Индия, Мексика, Бразилия, ЮАР, Перу, Чили, Казахстан. В них велика добыча цветных металлов (все страны), углерода угля и нефти (кроме Бразилии, Перу, Чили), Na и Cl (кроме ЮАР и Перу), Fe и Mn (кроме Перу и Чили). Среди неметаллов и металлоидов в основном добываются P (Австралия, ЮАР, Бразилия), S (кроме Перу, Бразилии), N и Br (Индия), F (ЮАР, Мексика), B (Перу, Чили, Казахстан), Se (Индия, Перу, Чили), I (Чили), As (Мексика, Перу, Чили, Казахстан). Большинство стран этой группы также характеризуется производством Ag, Au, Pt, Pd (кроме Казахстана). В этих странах добывают также Cd (кроме ЮАР, Бразилии, Чили), Cr (Индия, ЮАР, Казахстан), Zr (Австралия, Индия, ЮАР, Бразилия), Y (Индия, Бразилия). В некоторых странах производят Li (Австралия, Бразилия, Чили), TR (Индия, Бразилия), Ta (Австралия, Бразилия), Re (Перу, Чили, Казахстан), Nb, In и Te (Бразилия, Перу).

Интенсивная T_R (*100—50*). Это тоже 8 "полиэлементных" стран, но с уже меньшим набором добываемых элементов (в порядке уменьшения T_R): Польша, Япония, Иран, Германия, Индонезия, Украина, Испания, Боливия. Среди производимых элементов особо выделяется Ca (кроме Индонезии, Украины, Боливии), Na + Cl (Польша, Германия, Украина, Испания), K (Германия, Испания, Украина), C угля, газа и нефти (Польша, Иран, Индонезия). В этих странах добывают цветные металлы (Польша, Германия, Индонезия, Испания, Боливия), Fe (Иран, Украина), драгоценные металлы (Ag в Польше и Боливии, Au в Индонезии). Из неметаллов и металлоидов производят N и S (все страны), I (Япония, Индонезия), B (Иран, Боливия), Br (Испания, Япония, Германия, Украина), Se (Япония). В некоторых странах добывают экологически опасные металлы: Cd (Польша, Япония, Германия), Bi (Боливия), Mo (Иран), W и Sb (Боливия). В Японии добывают также In и Te.

Средняя T_R (*50—25*). К этой группе относятся 10 "полиэлементных" стран (по уменьшению T_R): Нидерланды, Венесуэла, Марокко, Франция, Великобритания, Турция, Саудовская Аравия, Вьетнам, Узбекистан, Бельгия. Эти страны характеризуются небольшим набором добываемых химических элементов: Na + Cl (Нидерланды, Франция, Великобритания), Ba (Марокко, Великобритания, Турция, Вьетнам), N (Нидерланды, Саудовская Аравия), S (Нидерланды, Венесуэла, Франция, Саудовская Аравия, Узбекистан), P и F (Марокко), I (Узбекистан), B (Турция), C нефти (Венесуэла, Саудовская Аравия), C газа (Нидерланды). В них получают также цветные металлы (Венесуэла, Вьетнам), Sr (Марокко, Турция), As (Марокко, Бельгия). Кроме того, в Нидерландах добывают Cd, в Венесуэле — Fe и Si, в Марокко — Co, в Великобритании — K, в Узбекистане — Au и Mo, в Бельгии — In и Se, во Вьетнаме — Ti, в Турции — Mg.

Таким образом, к числу *полиэлементных* относятся страны, величина T_R для которых превышает 25, т.е. они попадают в группы с очень высокой, высокой, интенсивной и средней региональной технофильностью.

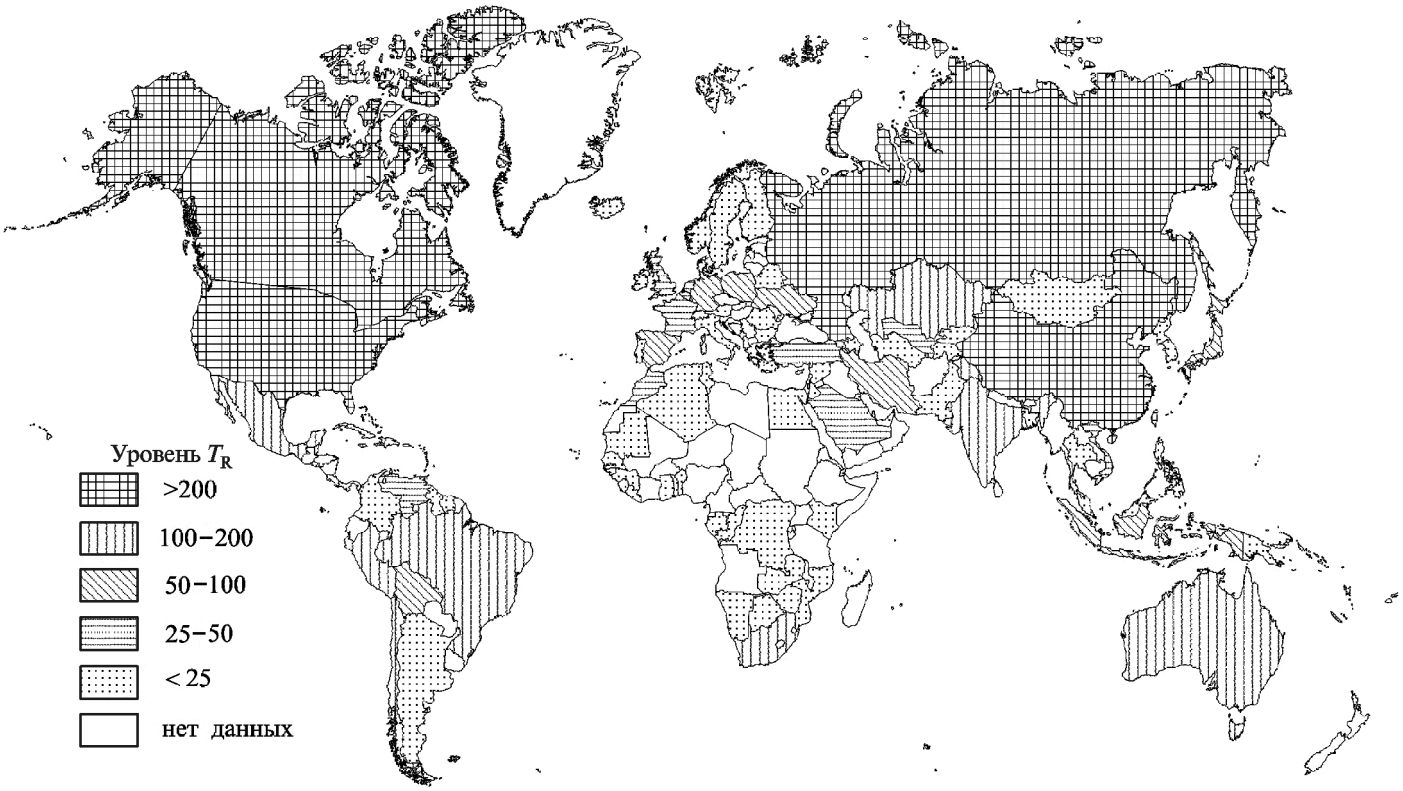

Рис. 4. Региональная технофильность различных стран (по данным о добыче элементов за 2008 г.)

Низкая T_R (*<25*). Эта группа включает 61 страну, в которых добывают от 1 до 3 элементов. Ее можно разделить на 3 подгруппы: трехэлементные, биэлементные и моноэлементные страны.

Трехэлементные страны ($T_R = 15 \div 25$). К этой подгруппе относятся 18 стран, в которых основной вклад в региональную технофильность вносят три химических элемента (в порядке убывания T_R): Аргентина (B, Ca, Li, Sr)[3], Колумбия (Ni, Pt, C угля), Республика Корея (Cd, In, S), Израиль (K, P, Br), Австрия (Ca, Mg, W), Иордания (K, P, Br), Египет (Ca, N, P), Швеция (Fe, Pb, Se), Алжир (Ba, Ca, C газа), Пакистан (Ba, N, Sr), Португалия (Li, W, Sn), Греция (Al, Mg, Ni), ОАЭ (Al, S, C нефти), Норвегия (Si, Ti, C газа), Конго (Co, Ta, Sn), Зимбабве (Li, Pd, Pt). К трехэлементным странам относятся также Кувейт (S, C нефти) и Катар (N, C газа) за счет высокого уровня добычи нефти и газа (высокие значения T_C).

Биэлементные страны ($T_R = 10 \div 15$). Это 17 стран, вклад в T_R которых вносят два химических элемента (в порядке уменьшения показателя): Италия (Ca, S), Ирландия (Pb, Zn), Армения (Mo, Re), Замбия (Co, Cu), Финляндия (S, Se), Филиппины (Ni, Se), Малайзия (Y, TR, Sn), Азербайджан и Туркменистан (I, Br), Киргизия (Hg, Mo), Монголия (F, Mo), Мозамбик (Al, Be, Ti), Куба и Новая Каледония (Co, Ni), Таиланд (Ca, Sn), Ботсвана (Na, Ni), Кения (Na, F). Поэлементный вклад в T_R в этих государствах невелик по сравнению со странами с более диверсифицированной и достаточно мощной добычей полезных ископаемых.

Моноэлементные страны ($T_R < 10$). Среди 26 стран, входящих в эту подгруппу, выделяются страны — производители отдельных химических элементов: N (Тринидад и Тобаго, Бангладеш, Румыния), P (Тунис, Сирия, Того, Сенегал), K (Белоруссия), Al (Исландия, Гвинея, Ямайка, Суринам, Гайана, Бахрейн), Au (Гана, Папуа-Новая Гвинея), Mg (КНДР, Словакия), Sb (Таджикистан), Mn (Габон), Ni (Доминика), Fe (Мавритания), F (Намибия), Ta (Руанда), Ba (Болгария), Ti (Сьерра-Леоне).

Заключение. За прошедшие полвека возросла технофильность элементов, применяемых в современных отраслях — энергетике (C, TR, Y, Nb, B, Zr, C, Si), космической промышленности (Ni, Al, In, Ta, Re, Nb), авиастроении (Ti, Al, Y, Nb), радиоэлектронике (TR, In, B), медицине (In, Ta, Pt, Pd, B, I, Zr) и металлургии (практически все металлы). Продолжилось установленное М.А. Глазовской для середины 60-х гг. XX в. “ожелезнение” поверхности нашей планеты, в начале XXI в. наметилась ее “металлизация” за счет увеличения масс вовлекаемых в техногенез металлов.

Впервые выявлено снижение технофильности некоторых химических элементов — Ca, Te, Tl, Hg. Для первых трех элементов это можно объяснить неполнотой информации об их добыче, а снижение тех-

[3] К этой подгруппе относится Аргентина, хотя она тяготеет к группе со средней T_R, поскольку вклад в региональную технофильность добываемых Li и Sr невелик.

нофильности ртути свидетельствует об осознании человечеством опасности этого металла и постепенном выведении его из производства и технического использования. Сильное уменьшение T_{Hg} произошло в последние годы, ознаменовавшие начало "малортутной" промышленности и "зеленой" экономики.

Выделена "полоса стабильности" технофильности (T от 10^9 до 10^{10}). Высказано предположение о том, что добыча элементов с $T < 10^9$ будет расти до тех пор, пока их технофильность не достигнет этой полосы, после чего произойдет стабилизация T, а через некоторое время и ее некоторое снижение. Замедление роста технофильности — одно из важнейших условий сохранения биосферы.

Технофильность различных элементов изменялась в течение последних 50 лет с разной скоростью. В последние 20 лет росла технофильность Y, V, In, Pd, Pt, Re, Mo, Bi, Sb, Cu, Zn. Для многих элементов быстрый темп роста T пришелся на период "грязной модернизации" 1960—1970-х гг., однако есть и такие элементы, для которых технофильность увеличивалась на протяжении полувека, к ним относятся Fe, Ti, Sr, Li, Al, Cr, Ni, Co, Nb, TR, Ga, B, I.

Предсказания А.Е. Ферсмана об изменении T в XX в. в общем оказались верны, но не произошло быстрого роста производства Mn, снизился уровень добычи отдельных элементов (например, Hg). Предложены 3 сценария изменения технофильности химических элементов в XXI в. Наиболее вероятен, по-видимому, сценарий попадания в "полосу стабильности", согласно которому в XXI в. будет быстро повышаться технофильность Al, Be, Ga, Ge, In, K, Li, Mg, Nb, Si, Sr, Ta, Ti, Tl, TR, V и Y, но снизится технофильность B, Bi, C, Cl и N.

Выполнена типология стран по уровню региональной технофильности. Наибольшая технофильность характерна для основных ресурсодобывающих (полиэлементных) стран. Средние значения T_R имеют в основном полиэлементные страны со значительно меньшим набором добываемых элементов. Минимальные значения T_R характерны для трехэлементных, биэлементных и моноэлементных стран — производителей трех, двух и одного химических элементов соответственно. Региональная технофильность может служить одним из показателей нового формирующегося направления в геохимии — геохимического страноведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555—571.

2. *Водяницкий Ю.Н.* Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. М.: ГНУ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии", 2009. 95 с.

3. *Глазовская М.А.* Техногенез и проблемы ландшафтно-геохимического прогнозирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1968. № 1. С. 30—36.

4. *Гринвуд Н.Н., Эрншо А.* Химия элементов. М.: Бином. Лаборатория знаний. Т. 1. 2008. 607 с.; Т. 2. 2008. 670 с.

5. *Ковда В.А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 260 с.

6. *Наумов А.В.* Обзор мирового рынка редкоземельных металлов // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2008. № 1. С. 22—31.

7. *Перельман А.И.* Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.

8. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. 3-е изд. М.: Астрея, 1999. 768 с.

9. *Ферсман А.Е.* Геохимия. Т. 2. Л.: Химтеорет, 1934. 354 с.

10. *Эмсли Дж.* Элементы. М.: Мир, 1993. 256 с.

11. *Ярошевский А.А.* Распространенность химических элементов в земной коре // Геохимия. 2006. № 1. С. 54—62.

12. Key world energy statistics. International Energy Agency, 2010. 80 p.

13. Mineral commodity summaries // U.S. Geol. Surv., 1999—2010 [Электронный ресурс]. URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/ (дата обращения 22.01.2011)

14. *Wedepohl K.H.* The composition of the continental crust // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1995. Vol. 59, N 7. P. 1217—1232.

Поступила в редакцию
16.06.2011

N.S. Kasimov, D.V. Vlasov

TECHNOPHILITY OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE BEGINNING OF THE 21ST CENTURY

The notion of "technophility" introduced by A.I.Perelman characterizes correlation between the intensity of use of chemical elements by the mankind and their mean concentrations in the lithosphere. Technophility of elements in the first decade of the 21st century is calculated and scenarios of its change towards the end of the century are suggested. New parameter, i.e. technophility index, is proposed to facilitate classification of the world countries in terms of the intensity of technogenesis.

Key words: technophilia, technogenesis, extraction of elements, geochemical regional geography.