



Bergvesenet

Postboks 3021, 7002 Trondheim

Rapportarkivet

Bergvesenet rapport nr BV 177	Intern Journal nr	Internt arkiv nr	Rapport lokalisering Trondheim	Gradering Åpen
Kommer fra ..arkiv Trondheimske	Ekstern rapport nr NGU 1897 A/1982	Oversendt fra	Fortrolig pga	Fortrolig fra dato:
Tittel Litteraturgransking av metoder for sepaarering, konsentrering og bestemmelse av gull i geologisk materiale				
Forfatter A. Kuldvare		Dato 19	Bedrift NGU	
Kommune	Fylke Norge	Bergdistrikt Trondheim	1: 50 000 kartblad	1: 250 000 kartblad
Fagområde Kjemisk analyse	Dokument type	Forekomster		
Råstofftype Malm/metall	Emneord Au			
Sammendrag				

NGU-rapport nr. 1897 A

Litteraturgranskning av metoder
for separering, konsentrering og
bestemmelse av gull
i geologisk materiale

1982



Norges geologiske undersøkelse

Leiv Eiriksons vei 39
Tlf. (075) 15860

Postboks 3006
7001 Trondheim

Postgironr. 5168232
Bankgironr. 0633.05.70014

Rapport nr. 1897 A		Åpen/Forbudsatt	
Tittel: Litteraturgranskning av metoder for separering, konsentrering og bestemmelse av gull i geologisk materiale.			
Oppdragsgiver: NGU		Forfatter: A. Kuldvere	
Forekomstens navn og koordinater:		Kommune:	
Fylke:		Kartbladnr. og -navn (1:50 000):	
Utført: 1982		Sidetall: 17 Tekstbilag: Kartbilag:	
Prosjektnummer og -navn: 1897 A Etablering av analysemetoder for gull. Prosjektleder: A. Kuldvere			
Sammendrag: Rapporten omhandler studier av litteratur over separering, konsentrering og bestemmelse av gull i geologisk materiale som er utført før året 1982. Studiene ble drevet med spesiell interesse for atomabsorpsjonsspektrofotometriske metoder, og med tanke på å etterprøve og etablere noen av dem ved vårt laboratorium.			
Nøkkelord	Litteraturstudier over analyse av gull.		

Ved referanse til rapporten oppgis forfatter, tittel og rapportnr.

Sammendrag av innholdet

Innledning.

En antikk gullanalyse.

Moderne analysemetoder for gull.

Blyperlemetoden for separering, konsentrering og bestemmelse av gull og andre edelmetaller.

Varianter av blyperlemetoden.

Hurtigere metoder for separering og bestemmelse av gull.

Neutronaktivering.

Atomabsorpsjon.

Cyanidekstraksjon.

Organisk solventekstraksjon.

Multielement-ekstraksjon.

Felling av gull sammen med bærermetaller.

Separering og konsentrering av gull ved bruk av ionebytting, adsorpsjon på kull og med "cementation".

Konklusjon.

Referanser.

INNLEDNING

Foreliggende litteraturgranskning er å betrakte som en følge av opprettelsen av prosjektet "Etablering av analysemetoder for gull". Det etablerte prosjektet er en del av et bredere prosjektforslag¹ hvor "gullprosjektet" er foreslått som første periode for å etterprøve:

- a) En hurtigmetode ifølge Kontas², som bygger på kopresipitering av gull med kvikksølv.
- b) En ekstraksjonsmetode med metyl isobutyl keton (MIBK) der Br_2 løst i HBr fungerer som oksydasjonsmiddel for gull³.

Det ble bestemt at A. Kuldvere blir prosjektleder for etterprøving av metoden a) med prosjektnummer 1897 A og at A. Flårønning blir prosjektleder for etterprøving av metoden b) med prosjektnummer 1897 B. Hvert av disse prosjekter vil bli avsluttet med en rapport som beskriver de eksperimentelle resultater av etterprøvingen, mens foreliggende rapport er ment å gi en nøkkel til litteraturen over forskjellige metoder om separering, konsentrering og bestemmelse av gull.

En antikk gullanalyse

Vitenskapelig sett er den kvantitative gullanalysens historie mer enn 2000 år gammel. Den begynte med et gledesrop i Syrakus, der Arkhimedes (287 - 212 f.Kr.) avreagerte sin oppdagelsesglede med å springe, naken, fra badet ut på gaten og der for øynene på sine forbausede medinnbyggere rope det berømte "Heureka!". Det han hadde oppdaget, idet han lå i badet, har etterverdenen kalt for Arkhimedes lov. Arkhimedes benyttet seg av loven og analyserte (påkledd?) gullgehalten i sin herskers kongekrone. Han beviste at alt som glitrer ikke behøver å være rent gull - gullsmiden hadde blandet sølv i herskerens "gullkrone".

Moderne analysemetoder for gull

Siden Arkhimedes tid har vitenskapsmenn overalt på vår vakre jord badet flittig, men uten det hell å få begivenhetene befestet i historien. Trass dette har analysemetoder for gull med tiden blitt utviklet og idag brukes teknikker som atomabsorpsjon, neutronaktivering, spektrokjemi, røntgenfluorescens, elektrometri (med metoder som polarografi, ampereometri og coulometri), spektrofotometri, gravimetri og titrimetri.

I den seneste historie innenfor forskningen av edelmetallanalyser har prof. F.E. Beamish (død 1976) vært kjent som en "grand old man". For nærværende er hans elev og arving av hans intellektuelle etterlatenskaper prof. J.C. van Loon en sentral figur i dette arbeid. Van Loon er kjent også i norske forskermiljøer, spesielt i Oslo, der han arbeidet som gjesteprofessor. Han har bl.a. gitt en forelesning i Røros (1979) ved 7. Arbeidsseminar i atomabsorpsjon-spektroskopi, der denne rapportens forfatter hadde den glede å få en prat med ham om metoder for gullbestemmelse.

Av Beamish' arbeider som er av interesse for denne rapport kan nevnes monografien "The analytical chemistry of the noble metals"⁴, og av de som han har utgitt sammen med van Loon - "Recent advances in the analytical chemistry of the noble metals"⁵ og "Analysis of the noble metals, overview and selected methods"⁶. Meget verdifulle er også Beamish' kritiske artikler (reviews) over analyseteknikker og -metoder for edelmetallbestemmelser⁷⁻¹¹.

Blyperlemetoden for separering, konsentrering og bestemmelse av gull og andre edelmentaller

Før atomabsorpsjonens og neutronaktivering-analysens inntreden var den klassiske blyperlemetoden (fire-assay using lead method) aleneherskende for bestemmelse av gull, platina og

palladium. Metoden går ut på at prøvematerialet i store mengder, 10-100 g (ofte opp til 500 g), blandes til en homogen blanding med en fluks som til 80% består av blyoksyd. Ved etterpåfølgende reduksjons- og sammensmeltingsprosess (1200°C) løses edelmetaller kvantitativt i det flytende blyet (blyperlen). Metoden anses fremdeles som sikrest og nøyaktigst for gull, palladium og platina og også for rhodium og iridium, dersom avdrivning av blyet ikke foretas på klassisk måte, men edelmetaller separeres ifølge perklorisyremetoden¹¹⁻¹².

Edelmetaller, og spesielt gull som forekommer gedigent fra bittesmå korn til store klumper er ofte inhomogent fordelt i bergarter og mineraler; de danner også særskilte edelmetall-mineraler og kan forekomme som faste løsninger i bergartsdannende mineraler og i kromitter og sulfider. Blyperlemetodens nøyaktighet består deri at den bruker en representativ prøveinnveining og løser, således, problemet grunnet inhomogenitet i prøvematerialet. Dessuten har den en god, praktisk talt, 100% ekstraksjonsevne for edelmetaller.

Varianter av blyperlemetoden

Det finnes mange nyere varianter av blyperlemetoden som istedenfor bly bruker andre samlere (collectors), som tinn¹¹⁻¹³, kobber¹¹, jern-kobber-nikkel¹¹ eller nikkel-sulfid¹⁴⁻¹⁶, men det eksisterer ikke noe bevis på at noen av disse skulle ha oppnådd bedre separasjon for gull, palladium eller platina enn den klassiske metoden med bly som samler. Tvertimot rapporteres det fra National Institut for Metallurgi (NIM)¹⁴ at nikkelsulfid istedenfor bly som kollektor medfører 10-20% lavere igjenvinning for gull og platina, mens igjenvinning for de øvrige edelmetaller (palladium, osmium, iridium, ruthenium) er kvantitativ.

Blyperlemetoden har den ulempen at selvom bly under smelteprosessen opptar alle edelmetaller kvantitativt, blir det alli-

kevel atskillig tap av osmium, ruthenium, rhodium og iridium under den etterfølgende avdriving av blyet (cupellation)¹⁴, hvis man ikke benytter seg av perklorsyre ekstraksjonen^{11,12}.

Ifølge Robert et.al.¹⁴ er nikkelsulfid, som kollektor, den eneste som klarer separasjonsoppgaven for å bestemme ruthenium, iridium og osmium i prøver som inneholder disse elementer på ppm-nivå (parts per 10⁶). Hoffman¹⁵ og Hoffman et.al.¹⁵ har brukt nikkelsulfid som kollektor for å isolere edelmetaller fra nikkelsulfidmalmer, og deretter bestemt disse med neutronaktiveringsmetoden.

Hurtigere metoder for separering og bestemmelse av gull

Selv om blyperlemetoden (og deres varianter) gir sikre og nøyaktige resultater, har dog utvikling i metodeforskning for edelmetallbestemmelse gått mot hurtigere, mindre kjemikalie- og prøvekrevende metoder; det har skjedd ofte med tap av nøyaktighet. Geokjemisk prospektering, spesielt, krever snar analysering av et stort antall prøver, ofte med liten prøvemengde, og er derfor i behov av hurtigere og billigere analysemetoder.

Veien til hurtigere metoder for bestemmelse av gull (og platinagruppermetaller) går over hurtigere og behendigere separasjons- og konsentrasjonsteknikker. Også den klassiske langtekkelige blyperlemetoden kan benytte seg av all moderne teknologi, fra og med det øyeblikk edelmetaller befinner seg i blyperlen.

Neutronaktivering

Neutronaktiveringsanalysens^{17,18} følsomhet ligger under ppb-nivå og prøver kunne analyseres direkte, dersom prøvematerialet var homogent og uten interferenser. Det er, dessverre, sjeldent fallet med gull og platinagruppermetaller i geologisk materiale og direkte utførte neutronaktiveringsanalyser må derfor, alltid bli suspekte, hvis det svikter i representativ prøvestørrelse, dvs. i homogenitet.

Atomabsorpsjon

For bestemmelse av gull med atomabsorpsjon (flamme eller grafittovn teknikk) er det alltid en fordel å få elementet separert fra så mange matriks komponenter som mulig, selv om elementkonsentrasjonen var tilstrekkelig (følsomhet pr. 1% absn. er 0.25 ugAu/ml med flamme og påvisningsgrense 11-37 pg Au absolutt med grafittovn HGA-500). Carlson og van Loon¹⁹ har vist at løsninger av jordprøver som totalt inneholdt 10 000 ppm kationer (Na, Ca, Mg, Al, Fe), hovedsaklig som klorider, ga absorpsjonssignaler (flamme) ved 242,8 nm Au-linje som svarte mot 4 ppm Au, selv om nærvær av Au var utesluttet. Grafittovntechnik er ennå mer utsatt for interferenser fra små mengder matriks salter enn flamme-absorpsjon, også legeringsdannelser og isomorf substitusjon kan gi feil ved gullbestemmelser med denne teknikk²⁰.

Atomabsorpsjon, med flamme og i særdeleshet kombinert med grafittovn, er dog den teknikk på hvilken hurtige separasjons/konsentrasjonsmetoder for gull er basert på. Av disse kan nevnes

Cyanidekstraksjon^{21,22}

Prøven blir behandlet (ekstrahert) med NaCN-løsning for 15 min. i nærvær av oksygen, sentrifugert og den klare løsningsgehalt på gull målt med et atomabsorpsjon spektrofotometer.

Den opprinnelige metoden bygger på flammemåling, men det burde (sannsynligvis) ikke være noe i veien å bruke grafittovn-teknikken. Metoden er spesielt egnet for bestemmelse av gull i kalksteinholdig materiale, på grunn av det alkaliske miljø som en kalksteinprøve representerer.

Organisk solventekstraksjon

Kvantitativ ekstraksjon av gull som Au(III) fra hydrogenbromidsyreløsning med forskjellige organiske løsningsmidler, etyl eter, etyl acetat, metyl isobutyl keton m.fl. er blitt rapportert²³. Metyl isobutyl keton (MIBK) som ekstraksjonsmiddel er blitt foretrukket av mange^{3, 24-27}. Metoden går ut på at gull i geologisk materiale løses i en løsning av hydrogenbromidsyre og brom til gull(III)bromid som ekstraheres med MIBK og måles direkte på gull ved 242.8 nm Au-linje med en atomabsorpsjon spektrofotometer (flamme eller grafittovn). Metoden er utarbeidet ved U.S. Geol. Survey^{24,25} og har blitt modifisert, sist av Meier³.

Også kloroauratkomplekset (dannes ved oppløsning av gull med kongevann) har blitt ekstrahert med MIBK og Au bestemt direkte i organisk fase med atomabsorpsjon^{28,29}.

Multielement-ekstraksjon

Noen kjemikere har lyktes med å isolere to edelmetaller i samme ekstraksjonsfase. Eller, de har separert metaller i grupper med å bruke organiske solvent-ekstraksjoner. Så har Rubeska et.al.³⁰, og Parkes og Murray-Smith³¹ bestemt gull og palladium i samme organiske fase med atomabsorpsjon (flamme såvel som grafittovn). De har brukt dibutyl sulfid i toluen³⁰, eller i di-isobutyl keton³¹. Clark og Viets^{32,33} har separert 18 elementer fra en kompleks mineralsyreoppslutning i forskjellige organiske faser, ved å benytte seg av organiske ekstraksjonssystemer, bl.a. har de fått gull alene i en fase og platina sammen med palladium i en annen fase. Deres hensikt med solvent ekstraksjon har vært å minske interferenser som oppstår med direktebestemmelse av elementer med atomabsorpsjon i en kompleks mineralsyreekstrakt.

Interessant i sammenhengen er også et arbeid av Brooks et.al.³⁴, hvor de har bestemt gull og sølv i samme kongevann - ekstrakt av bergarter og også av sulfidmalmer. Det synes at løsligheten av AgCl i kongevann egentlig er noe større enn en hittil ukritisk har trodd.

Felling av gull sammen med bærermetaller

Som bærermetaller brukes tellur^{28,35-37} eller kvikksølv^{2,38} og som reduksjonsmiddel hydrazinhydroklorid eller tinn(II)klorid. Ved bruk av tellur, ekstraheres gullet, etter oksyderende oppløsning av samfelt bunnfall, inn i MIBK-fasen og bestemmes direkte i denne fasen med atomabsorpsjon (flamme/grafittovn).

Endel atomabsorpsjon-instrumentering med grafittovn kan i det hele tatt ikke bruke organiske løsningsmidler, endel kan det, dersom innføring av prøven skjer manuelt mens noen få moderne instrumenter kan nytte også automatisk innføring av prøver i organiske løsningsmidler. Kontas² har utarbeidet en

metode for grafittovnteknikk som ikke bruker organisk løsningsmiddel. Gull blir felt sammen med kvikksølv som bærer. Tinn-(II)klorid brukes som reduksjonsmiddel. Bunnfelling (Hg/Au) løses i saltsyre-perhydrol og gullet bestemmes i denne løsning, for kvikksølv forstyrrer ikke ved grafittovnteknikken.

Separering og konsentrering av gull ved bruk av ione-
bytting, adsorpsjon på kull og med "cementation"

Metoden for separering av gull og av platinagruppe metaller ved bruk av ionebyttemasser (resins) har blitt referert av Beamish⁴ og Beamish og van Loon^{5,6}. Det synes at disse metoder, såsom opprinnelig utarbeidet, er noe langsomme og er ikke passende, spesielt ikke når gull alene skal bestemmes. Moderne kommersiell utrustning for ione-kromatografi som for eksempel presentert av firma Dionex, kan også på dette felt medføre en betydelig evolusjon.

Aktivert kull har blitt brukt siden 1880 for igjenvinning av gull fra løsninger med ekstremt lave gullkonsentrasjoner³⁹. For samme formål er det blitt brukt også utfelling på sink eller på aluminium (cementation)^{39,40}.

Disse metoder har en kompleks kjemi som ikke blir behandlet i dette skriv. Det er dog bra å vite at utfelling og konsentrering av gull (og andre edlere metaller enn Al) på aluminium brukes som rutine ved Macauley Institute for Soil Research⁴⁰ i Aberdeen.

KONKLUSJON

Litteraturen gir mange interessante muligheter for separering, konsentrering og bestemmelse av gull. Vår forutsetning var at bestemmelse skulle skje med grafittovnteknikk, dvs. med vår apparatur og at metoden skulle være hurtig.

I dette tilfelle blir Kontas² metode uten tvil den hurtigste. Dette på grunn av små innveininger (maks. 1 g) som medfører små volumer ved bearbeidelse av prøver med et minimum av tidsforbruk. I tillegg til dette kan vår apparatur med prøveveksler fullt utnyttes ved bruk av vannholdige løsninger. Standardutrustning til prøveveksler As-40 (flushing-pump, prøvekopper m.m.) tåler ikke organiske løsningsmidler.

Meget interessant metode i sammenhengen er også den av Meier³ modifiserte. Med muligheter til større innveininger passer den bedre for inhomogent materiale. Selvom innføring av MIBK-ekstrakt skulle skje manuelt, kan en rutinert analytiker utføre dette nesten like hurtig som en prøveveksler, men utstyr som tåler organisk løsningsmiddel er, selvfølgelig, å foretrekke.

Kontas metode bruker kongevann ved oppslutning av prøver og Meiers HBr/Br₂. Ingen av disse oppsluttingsmedier løser gull innesluttet i små kvartskorn eller annet materiale som ikke påvirkes av disse syrer og oksydasjonsmidlet brom. Hensyn til dette må taes ved nedknusing av prøver, og disse oppsluttingsprosedyrer skal kompletteres med andre (f.eks. HF) når det viser seg å være nødvendig.

REFERANSER

1. Kuldvere, A., Forslag til etablering av prosjekt for undersøkelse av organiske ekstraksjonssystemer for isolering og bestemmelse av sporelementer i komplekse geologiske materialer, NGU, 12.10.1981.
2. Kontas, E., Rapid determination of gold by flameless atomic absorption spectrometry in the ppb and ppm ranges without organic solvent extraction, Atomic Spectrosc. 2 (1981) 59.
3. Meier, A.L., Flameless atomic-absorption determination of gold in geological materials, Journal of Geochemical Exploration 13 (1980) 77-85.
4. Beamish, F.E., The analytical chemistry of the noble metals, Pergamon press, 1962.
5. Beamish, F.E. and van Loon, J.C., Recent advances in the analytical chemistry of the noble metals, Oxford, Pergamon, 1972.
6. Beamish, F.E. and van Loon, J.C., Analysis of the noble metals, overview and selected methods, Academic press, New York, San Francisco, London, 1977.
7. Beamish, F.E., A critical review of titrimetric methods for determination of the noble metals II., Talanta 13 (1966) 1053-68.
8. Beamish, F.E., A critical review of gravimetric methods for determination of the noble metals VII., Talanta 13 (1966) 773-801.
9. Beamish, F.E., A critical review of electroanalytical methods for the noble metals, Anal. Chim. Acta. 44 (1969) 253-286.

10. Beamish, F.E., Lewish, C.L. and van Loon, J.C., Atomic absorption, spectrochemical and X-ray fluorescence methods for the determination of the noble metals, *Talanta* 16 (1969) 1-25.
11. Beamish, F.E. and van Loon, J.C., The present status of methods of separating and determining the noble metals, *Minerals Sci. Engng.* 4 (1972) 3-17.
12. Diamantatos, A., Recovery of platinum, rhodium, iridium and gold after lead fusion and perchloric acid parting, *Anal. Chim. Acta* 92 (1977) 171-81.
13. Faye, G.H. and Inman, W.R., The determination of platinum and palladium in copper-nickel matte and ore concentrations, *Anal. Chem.*, 33 (1961) 278.
14. Robert, R.V.D., van Wyk, E. and Palmer, R., Concentration of the noble metals by a fire-assay technique using nickel sulphide as the collector. National Institute for Metallurgy (NIM), report No 1371, 1971.
15. Hoffman, E.L., The platinum group element and gold content of some nickel sulphide ores. Dissertation for the degree of doctor of philosophy at the University of Toronto, 1978.
16. Hoffman, E.L., Naldrett, A.J., van Loon, J.C., Hancock, R.G.W. and Manson, A., The determination of all the platinum group elements and gold in rocks and ore by neutron activation analysis after preconcentration by a nickel sulphide fire-assay technique on large samples, *Anal. Chim. Acta.* 102 (1978) 157-166.
17. Brunfelt, A.O. and Steinnes, E. (Editors)., Activation analysis in geochemistry and cosmochemistry, Universitetsforlaget, 1971.

18. Gijbels, R. and Hoste, J., Nuclear analytical methods in production and industrial use of noble metals. Symposium on nuclear analysis techniques, Brussels, Nov. 1971.
19. Carlson, G.G. and van Loon, J.C., Determination of gold in solution containing high concentrations of other salts, At. Absorpt. News1. 9 (1970) 90-91.
20. Clark, J.R. and Viets, J.G., Multielement extraction system for the determination of 18 trace elements in geochemical samples, Anal. Chem. 53 (1981) 61-65.
21. Olson, M., Gold assay by atomic absorption spectrophotometry: A preliminary report, At. Absorpt. News1. 4 (1965) 278.
22. Simmons, E.C., Gold assay by atomic absorption spectrophotometry, At. Absorpt. News1. 4 (1965) 281.
23. Morrison, G.H. and Freiser, H., Solvent extraction in analytical chemistry, New York, Wiley, 1957.
24. Tindall, F.M., Silver and gold assay by atomic absorption spectrophotometry, At. Absorpt. News1. 4 (1965) 339.
25. Thompson, C.E., Nakagawa, N.H. and Vansickle, G.H., Rapid analysis for gold in geological materials, U.S. Geol. Survey, Washington, Prof. paper 600B, 1968 pp. 130-132.
26. Lovering, T.G., Lakin, H.W. and Hubert, A.E., Concentration and minor element association of gold in ore-related jasperoid samples, U.S. Geol. Survey, Prof. paper 600B, 1968, pp 112-114.
27. Sighinolfi, G.P. and Santos, A.M., Determination of gold in geological samples at parts per milliard levels by flameless atomic-absorption spectroscopy, Microchimica Acta, Wien, 1976II, pp. 33-40.

28. Hildon, M.A. and Sully, G.R., The determination of gold in the ppb and ppm ranges by atomic absorption spectrophotometry, *Anal. Chim. Acta* 54 (1971) 245-251.
29. Bouchetta, M. and Fritsche, J., Use of atomic absorption in the determination of micro amounts of gold in soil and rock samples, *Dosage Elem. Etat. Trace Toches Antres Subst. Mines. Natur. Actes Coll.*, 1968, 26308.
30. Rubeska, J., Korecková and Weiss, D., The determination of gold and palladium in geological materials by atomic absorption after extraction with dibutyl sulphide, *At. Absorpt. Newsl.* 16 (1977) 1.
31. Parkes, A. and Murray-Smith, R., A rapid method for the determination of gold and palladium in soils and rocks, *At. Absorpt. Newsl.* 18 (1979) 57.
32. Clark, J.R. and Viets, J.G., Multielement extraction system for the determination of 18 trace elements in geochemical samples, *Anal. Chem.* 53 (1981) 61-65.
33. Clark, J.R. and Viets, J.G., Back-extraction of trace elements from organometallic-halide extracts for determination by flameless atomic absorption spectrometry, *Anal. Chem.* 53 (1981) 65-70.
34. Brooks, R.R., Holzbecher, D.E. and Zhaug, H.F., A rapid method for the determination of gold and silver in sulfide ores and rocks, *Atomic Spectrosc.* 2 (1981) 151.
35. Onishi, H., Spectrophotometric determination of traces of gold with rhodamine B, *Mikrochim. Acta* 1 (1959) 9.
36. Marmenko, J. and May, I., Fluorometric determination of gold in rocks with rhodamine B, *Anal. Chem.* 40 (1968) 1137.

37. Chow, A. and Beamish, F.E., An experimental evaluation of neutron activation, wet assay and fire assay methods of determination gold in ores, *Talanta* 14 (1967) 219.
38. Barnard, E. and Seeman, P.M., Die Konsentrering en Spektrografiese Bepaling van Edelmetale in Gesteentes en Roste, *Tegnikon*, 1958, 63.
39. Finkelstein, N.P., The chemistry of the extraction of gold from its ores, in "Metallurgy in South Africa" by R.J. Adamson (editor), Cape & Transvaal Printers Ltd., Cape Town, 1972.
40. Welch, K.H. and Ure, A.M., Concentration procedures for trace element analysis by spark source mass spectrometry, *Analytical Proceedings* 17 (1980) 8.